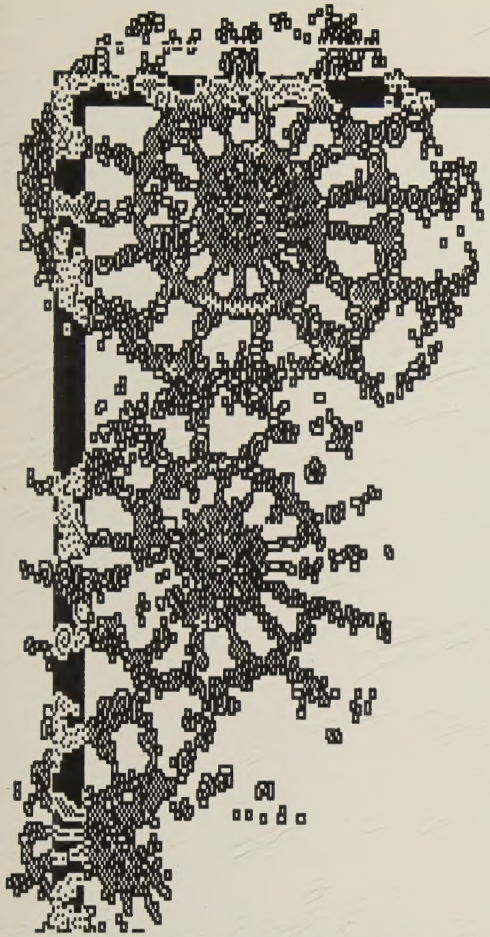
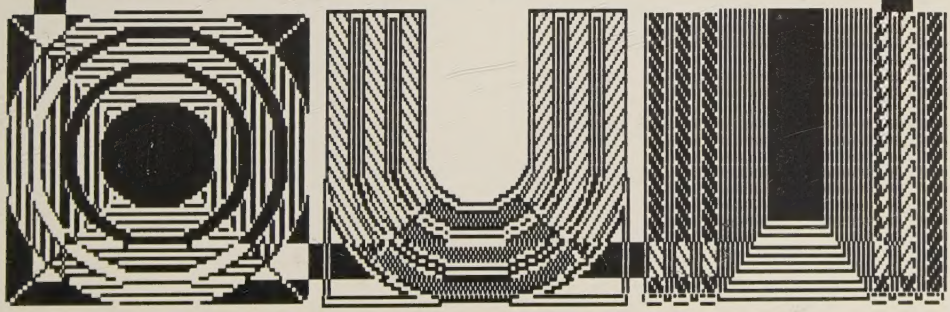


Barbara Becker

WISSEN UND PROBLEMLÖSUNG IM SPIEGEL NEUER ENTWICKLUNGEN DER COMPUTERTECHNOLOGIE

Bestandsaufnahme und Versuch der Einschätzung des soziokulturellen Phänomens Künstliche Intelligenz



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538102_0012

WISSEN UND PROBLEMLÖSUNG IM SPIEGEL NEUER ENTWICKLUNGEN DER COMPUTERTECHNOLOGIE

Bestandsaufnahme und Versuch der Einschätzung des soziokulturellen Phänomens Künstliche Intelligenz

Vorgelegt als Dissertation im Fachbereich 14 Gesellschaftswissenschaften - Philosophie - Theologie Fach: Soziologie Universität Dortmund

von
Barbara Becker

Gutachter:

Prof. Dr. Konrad Pfaff, Universität Dortmund
Prof. Dr. Udo L. Figge, Universität Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 1986

Einleitung

Die letzten Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts sind ein Zeitraum extremen Wandels und tiefgreifender Veränderungen. Abgesehen von der zum ersten Mal in der Geschichte möglichen und drohenden Vernichtung ihrer Art, sind wohl zwei Wissenschaftszweige für die Zukunft der Menschheit ausserordentlich bedeutsam und stellen gleichermaßen Hoffnung und Gefahr dar: Gentechnologie und Künstliche Intelligenz.

Weite Teile von Wissenschaft und Bevölkerung erkennen offenbar die Gefahren einer Manipulation der Erbmasse, insbesondere wenn die momentane Entwicklung zu Ende gedacht wird, obwohl bislang alle Entwicklungen in diesem Bereich positiv sind und kurzfristig mögliche Auswirkungen lediglich über Wechselwirkungen im bekannten Fremdkörper-Abwehr-System denkbar erscheinen, wenn der Mensch Kontakt bekommt zu genmanipulierten Organismen. Erst langfristig, wenn gesellschaftliche und wissenschaftliche Selbstbeschränkung es nicht verhindern, können die Veränderungen der Gene des Menschen, schleichend wirkend und sich verheerend auswirkend, Einfluß gewinnen. Diese Probleme werden öffentlich diskutiert, sie sind sogar bereits Gegenstand von Überlegungen im politischen, bzw. gesetzgeberischen Bereich. Die Diskussion selbst scheint die wesentlichen Fragen zu treffen und wirft Probleme zu Recht vor allem im ethischen Bereich auf.

Ganz anders im Bereich der Computertechnologie: Zwischen Roboterherrschaftsmärchen und der Sorge um Arbeitsplatzvernichtung bewegt sich die Kritik an der Oberfläche. Ihr Gegenstand ist die Bedrohung in ihrer offensichtlichsten Form, im Bereich materieller Interessen, in der Überlegenheit der Computertechnologie in gewissen physischen sowie 'zähl- und rechentechnischen' Bereichen. Daß etwa Einflüsse auf Sprache und Denken von der Benutzung und dem Umgang mit Computern ausgehen, und daß diese so gravierend sein könnten, daß die letzliche Anpassung der Maschine an den Menschen nicht mehr nötig wäre, weil dies bereits in der umgekehrten Richtung geschehen sein wird, diese Frage stellt sich wohl nicht zuletzt deshalb nicht in der kritischen Öffentlichkeit, weil die Kenntnisse über neue Entwicklungen gering und die zugänglichen Infomationen dürftig und zum größten Teil veraltet oder weitgehend tendenziös sind.

So liegt es nahe, den vorhandenen Überblicksarbeiten aus dem für die künftige Entwicklung wichtigsten Bereich der Computertechnologie - der Künstlichen Intelligenz - eine Bestandsaufnahme mit der besonderen Wichtung und Sichtweise der Gesellschaftswissenschaften gegenüberzustellen. Hier soll unabhängig von der immanenten Euphorie und Euphemisierung, aber ebenso weit entfernt von einer blinden Verteufelung oder der gefährlichen - z.T. betont gewollten - Ignoranz in weiten Teilen der kritischen Geisteswissenschaft der Stand der Forschung und der Umfang der Anwendung von Programmen aus speziell gewichteten Teilbereichen der Künstlichen Intelligenz dargestellt werden.

Nach einem Überblick über die historische Entwicklung der Künstlichen Intelligenz-Forschung und die Randbedingungen ihrer Entstehung, eingebettet in das Gesamtgefüge gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Einflüsse zur Zeit der ersten Ideen zur Simulation von Intelligenz in Computern, werden die Gründe für erste Erfolge mit der damit verbundenen Überschätzung der Methode, das schnell darauffolgende Scheitern und schließlich Ursachen für den Wiederaufschwung und die beginnende und nun rasch um sich greifende Verbreitung aufgezeigt. Es schließt sich eine - wo nötig ins Detail gehende - Darstellung wesentlicher Methoden der Forschung an, die als Voraussetzung zu sehen ist für die Beschreibung der Defizite. Viele Teilaspekte der Methodologie und die Problematik ihrer Benutzung werden aufgezeigt in einem Teilbereich der Künstlichen Intelligenz, der am umfangreichsten gleichzeitig aktuelle Forschung und praktische Nutzung repräsentiert - den Expertensystemen.

Neben einem Überblick über die Verfahren der Wissensrepräsentation und Problemlösung sowie über einzelne existierende Beispiele werden zwei Expertensysteme detailliert bearbeitet, an denen sich viele Prinzipien und offene Fragen gut aufzeigen lassen: das fast schon klassisch zu nennende MYCIN und das für didaktische Anwendung konzipierte GUIDON.

Eine solche Arbeit verfehlte ihr Ziel, wenn sich dieser Bestandsaufnahme über einen Bereich, dessen vorsichtige Vertreter vorgeben, Intelligenz zu simulieren, und dessen weniger skeptische Avantgarde Computern bereits eigene Intelligenz zuspricht, nicht eine ebenso umfangreiche Darstellung des Forschungsstandes in Hirnphysiologie, Kognitionspsychologie und Epistemologie anschlösse. Dadurch erst wird die Basis geschaffen für den Versuch, in einem Stadium, wo die Einflüsse dieser neuen Technologie noch nicht sichtbar sind, Hypothesen über mögliche Auswirkungen zu bilden, Grundlagen für eine kritische Bewertung aufzuzeigen und eine Einschätzung im Rahmen geisteswissenschaftlicher Forschung vorzunehmen.

Die eher abstrakte und notwendig isolierte Darstellung dieser polyvalenten Bereiche soll dann einfließen in die Bearbeitung eines konkreten Beispiels menschlicher Intelligenz - der medizinischen Problemlösung.

Dieses Thema bietet sich aus mehreren Gründen an:

- Die Geschichte der Entwicklung von Expertensystemen ist auch und vor allem eine Geschichte der medizinischen Expertensysteme.

- Wenige Bereiche komplexer menschlicher Tätigkeit sind - nicht zuletzt unter dem Einfluß der Künstlichen Intelligenz - wenn auch nicht gerade von ihren Befürwortern - so gut untersucht wie die medizinische Problemlösung.

- Medizinische Expertensysteme gehören zu den ersten weit verbreiteten und tatsächlich auch von Computerlaien genutzten und für diese geschaffenen Programmen der Künstlichen Intelligenz überhaupt.

- Einige Probleme des Einsatzes treten in diesem Bereich schärfer zu Tage; dies betrifft ethische Fragestellungen ebenso wie eher praktische Probleme, etwa das der juristischen Verantwortung.

Inhalt dieser Arbeit ist aber nicht zuletzt die Klärung und Einordnung vieler Begriffe, die durch ihre Benutzung im Bereich der Künstlichen Intelligenz eine z.T. erhebliche Verschiebung oder Veränderung ihrer Bedeutung erfahren haben. Wenn aus 'Gültigkeit' 'Effizienz', aus 'Sinn' 'Bedürfnis und Akzeptanz', oder aus 'Erkenntnis' 'Informationszuwachs' wird, tut eine klare Definition dessen not, worüber man spricht.

Inhaltsverzeichnis

1 Die Künstliche Intelligenzforschung.....S. 1

1.1 Allgemeiner Überblick über die Künstliche Intelligenz.....S. 1

1.1.1 Definitionsversuch.....S. 1

1.1.2 Zielsetzungen.....S. 1

1.1.3 Geschichte der KI-Forschung.....S. 1

1.1.4 Inhaltliche Abgrenzung der Künstlichen Intelligenz.....S. 2

1.1.5 Institutionalisierung.....S. 3

1.1.6 Entwicklung von unterschiedlichen "Schulen".....S. 3

1.1.7 Forschungszweige.....S. 5

1.1.8 Gesellschaftliche Entwicklung der Künstlichen Intelligenz...S. 7

1.2 Theoretische Aspekte der Künstlichen Intelligenz.....S. 7

1.2.1 Einleitung.....S. 7

1.2.2 Der Intelligenzbegriff in der KI-Forschung.....S. 7

1.2.3 Das Theorieverständnis in der KI-Forschung.....S. 8

1.2.4 Paradigmen der KI-Forschung.....S. 10

1.2.5 Methoden der KI-Forschung.....S. 10

1.2.6 Das Problemverständnis in der KI-Forschung.....S. 12

1.2.7 Wissenschaftstheoretische Implikationen der KI-Forschung....S. 12

2 Die Repräsentation von Wissen in Computern.....S. 14

2.1 Allgemeine Grundlagen zur Wissensrepräsentation.....S. 14

2.1.1 Einleitende Bemerkungen.....S. 14

2.1.2 Probleme der Transformation von Wissen.....S. 15

2.1.3 Allgemeine Fragen der Wissensrepräsentation.....S. 15

2.1.4 Bedingungen für die Repräsentation von Wissen.....S. 15

2.1.5 Kriterien für die Implementation von Wissen.....S. 16

2.1.6 Grundsätzliche Unterschiede zwischen Repräsentationsstrukturen.....S. 18

2.2 Formallogische Wissensrepräsentation.....S. 19

2.2.1 Allgemeine Grundlagen.....S. 19

2.2.2 Aussagenlogik.....S. 20

2.2.3 Inferenzen in der Aussagenlogik.....S. 21

2.2.4 Die Prädikatenlogik.....S. 22

2.2.5 Inferenzregeln der Prädikatenlogik.....S. 23

2.2.6 Einschätzung der formallogischen Wissensrepräsentation.....S. 24

2.3 Semantische Netzwerke.....S. 24

2.3.1 Allgemeine Grundlagen.....S. 24

2.3.2 Die Struktur semantischer Netzwerke.....S. 25

2.3.3 Schlußfolgerungsmöglichkeiten in semantischen Netzen.....S. 27

2.3.4 Einschätzung von semantischen Netzwerken.....S. 27

2.4 Frames.....S. 29

2.4.1 Allgemeine Grundlagen.....S. 29

2.4.2 Die Struktur eines Frames.....S. 29

2.4.3 Vernetzung von Frames.....S. 31

2.4.4 Schlußfolgerungen in frame-basierten Systemen.....S. 31

2.4.5 Einschätzung.....S. 32

2.5 Scripts.....S. 33

2.5.1 Allgemeine Bemerkungen.....S. 33

2.5.2 Der Aufbau eines Scripts.....S. 33

2.5.3 Schlußfolgerungsmöglichkeiten mit Scripts.....S. 35

2.5.4 Einschätzung.....S. 36

2.6 Produktionsregeln und Produktionssysteme.....S. 37

2.6.1 Allgemeine Grundlagen.....S. 37

2.6.2 Schlußfolgerungsmöglichkeiten in Produktionssystemen.....S. 38

2.6.3 Einschätzung von Produktionssystemen.....S. 40

3 Problemlösungen in Computern.....S. 41

3.1 Problemlösungen und Kontrollfunktionen in KI-Systemen.....S. 41

3.1.1 Das Problemkonzept in der KI-Forschung.....S. 41

3.1.2 Suchprozeduren....S. 43

3.1.2.1 Nichtheuristische Suchprozeduren....S. 44

3.1.2.2 Heuristische Suchverfahren....S. 46

3.1.3 Kontrollregeln und Kontrollsteuerung in KI-Systemen....S. 47

3.2 Schlußfolgerungen und logische Beweisverfahren....S. 50

3.2.1 Allgemeine Bemerkungen....S. 50

3.2.2 Das Resolutionsverfahren....S. 51

3.2.3 Die Methode der "Natural Deduction"....S. 53

3.2.4 Nonmonotonic Logic....S. 53

3.3 "Statistical" und "probabilistical Reasoning"....S. 56

4 Expertensysteme....S. 58

4.1 Allgemeine Überblick....S. 58

4.1.1 Einleitende Bemerkungen....S. 58

4.1.2 Zielsetzungen....S. 58

4.1.3 Charakterisierung des Forschungszweiges "knowledge engineering"....S. 58

4.1.4 Gütekriterien von Expertensystemen....S. 59

4.1.5 Historische Entwicklung von Expertensystemen....S. 60

4.1.7 Aufgabenbereiche von Expertensystemen....S. 63

4.2 Beispielsysteme....S. 64

4.2.1 Einige der wichtigsten Expertensysteme....S. 64

4.2.2 Weitere Expertensysteme....S. 67

4.3 Techniken und "Paradigmen" einer automatisierten Diagnose in der Medizin....S. 69

4.3.1 Allgemeine Bemerkungen....S. 69

4.3.2 Datenanalyse-Programme....S. 69

4.3.3 Mathematische Modelle....S. 69

4.3.4 Statistische Mustererkennungstechniken....S. 70

4.3.5 Bayes-Theorem....S. 70

4.3.6 Konzept der Entscheidungstheorie....S. 70

4.3.7 Symbolische Schlußfolgerungsprozesse.....S. 71

4.4 Grundlagen der Konzeption medizinischer Expertensysteme.....S. 71

4.4.1 Die Bedeutung der KI-Forschung für Automatisierungsbemühungen in der Medizin.....S. 71

4.4.2 Die Besonderheiten des medizinischen Fachgebiets.....S. 72

4.4.3 Expertensysteme in Gegenüberstellung zu medizinischen Fachbüchern.....S. 73

4.4.4 Medizinische Problemlösung: Charakteristika und Realisation im Computer.....S. 74

4.5 Prototypisches System: MYCIN.....S. 76

4.5.1 Einleitende Bemerkungen.....S. 76

4.5.2 Die Wissensbasis in MYCIN.....S. 76

4.5.3 Die dynamische Wissensbasis.....S. 78

4.5.4 Die Problemlösung in MYCIN.....S. 79

4.5.5 Funktionen.....S. 80

4.5.6 Die Sicherheitsfaktoren.....S. 80

4.5.7 Der Kontrollbaum.....S. 81

4.5.8 Die Dialogfähigkeit von MYCIN.....S. 81

4.5.9 Die Erklärungskomponente in MYCIN.....S. 83

4.5.10 Das Wissensakquisitionsprogramm für MYCIN: THEIRESIAS.....S. 84

4.6 Prinzipien didaktischer Expertensysteme.....S. 84

4.6.1 Konzepte zum Computereinsatz im Unterricht.....S. 84

4.6.2 Prinzipien von ICAI-Systemen.....S. 86

4.6.3 Das Didaktik-Modul.....S. 87

4.7 Prototypisches System: GUIDON.....S. 88

4.7.1 Einleitende Bemerkungen.....S. 88

4.7.2 Die Struktur von GUIDON.....S. 89

4.7.3 Die fachspezifische Wissensbasis.....S. 89

4.7.4 "Teaching Expertise".....S. 90

4.7.5 Das Kommunikationsmodell.....S. 91

4.7.6 Dialogmodul.....S. 92

4.7.7 Der Instruktionsprozeß.....S. 93

4.7.8 Bewertung des Systems.....S. 94

5 Immanente Kritik an Expertensystemen.....S. 96

5.1 Mängel und Grenzen von Wissensbasen und Problemlösungsmethoden in Expertensystemen.....S. 96

5.1.1 Allgemeine Bemerkungen.....S. 96

5.1.2 Kritik an der Repräsentation von Wissen in Expertensystemen.....S. 96

5.1.3 Defizite der Problemlösungsmethoden in Expertensystemen.....S. 98

5.2 Grenzen der Dialogfähigkeit.....S.100

5.3 Prinzipielle Probleme von Expertensystemen.....S.101

6 Neurophsiologische Grundlagen von Wissen und Problemlösung.....S.104

6.1 Philosophische Grundlagen des Leib-Seele-Problems.....S.104

6.2 Das organische Substrat des Bewußtseins.....S.105

6.2.1 Die Besonderheiten des ZNS.....S.105

6.2.2 Die Hirnfunktionen.....S.108

6.2.3 Wahrnehmung und Empfindung.....S.108

6.2.4 Rechte und linke Hirnhemisphäre.....S.109

6.3 Die geistigen Objekte.....S.110

6.4 Das menschliche Gedächtnis.....S.112

6.5 Denken.....S.114

6.5.1 Neurophysiologsche Aspekte menschlicher Denktätigkeit.....S.114

6.5.2 Kognition.....S.115

6.5.3 Kreativität.....S.115

6.6 Das Bewußtsein.....S.116

6.7 Eine Gegenüberstellung von Mensch und Maschine.....S.118

7 Die kognitiven Fähigkeiten des Menschen: Psychologische Erklärungsansätze über Wissen und Problemlösung.....S.121

7.1 Psychologische Konzepte über das menschliche Denken.....S.121

7.2 Theoretische Basis.....S.122

7.3 Die kategorielle Wirklichkeitserfassung des Menschen.....S.123

7.3.1 Kategorisierung von Informationen.....S.123

7.3.2 Begriffsbildung.....S.125

7.3.3 Sprache und Perzeption als Basis der Kategorienbildung.....S.126

7.4 Das menschliche Gedächtnis.....S.127

7.4.1 Die Repräsentation von Wissen.....S.127

7.4.2 Modelle über das semantische Gedächtnis.....S.128

7.4.3 Aktives strukturales Netzwerk.....S.130

7.4.4 Das propositionale Wissen.....S.131

7.4.5 Das räumliche Wissen.....S.132

7.4.6 Das Alltagsgedächtnis.....S.133

7.5 Verstehen.....S.135

7.6 Problemlösung.....S.138

7.6.1 Konzepte zur Problemlösung.....S.138

7.6.2 Das syllogistische Denken.....S.139

7.6.3 Interne Repräsentation von Problemen.....S.140

7.6.4 Problemlösungsstrategien.....S.141

7.6.5 Das schöpferisch-kreative Problemlösen.....S.144

8 Problemlösung in der Medizin.....S.147

8.1 Allgemeine Bemerkungen zur medizinischen Problemlösung.....S.147

8.2 Theoretische Basis.....S.147

8.2.1 Theoriekonzepte zur medizinischen Problemlösung.....S.147

8.2.2 Methodenprobleme.....S.149

8.3 Wissensorganisation und Wissensabruf bei Medizinern.....S.149

8.4 Der ärztliche Diagnoseprozeß.....S.151

8.4.1 Allgemeines zur Diagnosefindung.....S.151

8.4.2 Datengewinnung/Anamneseerhebung.....S.153

8.4.3 Hypothesengenerierung und -überprüfung.....S.154

8.4.4 Hermeneutischer Zugang.....S.156

8.5 Wissenschaftstheoretische Implikationen.....S.157

8.6 Einsatzmöglichkeiten von Expertensystemen.....S.158

8.7 Die Darstellung von Wissen in medizinischen Fachbüchern.....S.158

8.8 Grenzen der maschinellen Diagnostik.....S.160

9 Epistemologische Aspekte der Künstlichen Intelligenz.....S.162

9.1 Zur Frage der Formalisierbarkeit des Denkens und des Bewußtseins.....S.162

9.1.1 Einleitende Bemerkungen.....S.162

9.1.2 Die erkenntnistheoretische Position der KI-Forschung.....S.162

9.1.3 Philosophische Tradition der KI-Forschung.....S.163

9.2 Kritik der Wissensrepräsentation.....S.164

9.2.1 Grundsätzliche Fragen zur Implementation von Wissen.....S.164

9.2.2 Das Mikrowelt-Konzept der KI-Forschung.....S.164

9.2.3 Problematisierung der computerinternen Repräsentation von Alltagswissen.....S.165

9.2.4 Beschränkung auf verbalisierbares Wissen.....S.166

9.2.5 Formalisierung von Wissen.....S.167

9.3 Das menschliche Denken.....S.169

9.4 Abschließende erkenntnistheoretische Überlegungen.....S.172

Anmerkungen.....S.176

Literatur.....S.194

1.1 Allgemeiner Überblick über die Künstliche Intelligenz

1.1.1 Definitionsversuch

Der Versuch, eine möglichst präzise und innerhalb der Forschungsrichtung einheitliche Definition der Künstlichen Intelligenz zu finden, erweist sich als schwierig angesichts der Variationsbreite von Erklärungs- und Bestimmungsversuchen. Die Diffusität des Begriffsgebrauchs ist charakteristisch für die Schwierigkeiten der Künstlichen-Intelligenz-Forschung, eine Selbstbestimmung vorzunehmen und sich von anderen Zweigen der Computerwissenschaften abzugrenzen (1).

Trotz dieser Schwierigkeiten gilt der Definitionsversuch Minsky`s als allgemein akzeptiert: "Artificial Intelligence is the science of making machines do things that would require intelligence if done by men" (2). Dieser relative globale Charakterisierungsversuch wird durch die Zielsetzung des japanischen Forschungsprojekts der "Computer der Fünften Generation" noch weiter gefaßt, indem Maschinen konstruiert werden sollen, "that can reason and perceive" (3). Konkreter ausgedrückt beziehen sich die Ziele der Künstlichen-Intelligenz-Forscher (im Folgenden verkürzt als KI-Forscher bezeichnet) auf die Entwicklung von Computersystemen, "that can learn, associate, make inferences, make decisions, and otherwise behave in ways we have always considered the exclusive province of human reason" (4). Unter dem Begriff der Intelligenz werden demnach in der KI-Forschung verschiedene kognitive Fähigkeiten subsumiert; zu diesen zählen Sprachverständnis und Sprachfähigkeit, Problemlösungen in komplexen Gebieten, logische Schlußfolgerungen, Organisation und Umgang mit Wissen und Lernfähigkeit (5).

1.1.2 Zielsetzungen

Die Zielsetzungen, die mit der Künstlichen Intelligenz verknüpft werden, richten sich vorwiegend darauf, effiziente, d.h. leistungsfähige Software zu entwickeln, die universeller anwendbar ist als herkömmliche Computerprogramme und die über eine größere Kapazität und Kompetenz verfügt. Neben dieser verwertungsorientierten Perspektive wird eine zweite Absicht verfolgt, die allerdings einen geringeren Stellenwert innehat; man erhofft, durch die Entwicklung von "intelligenten" Computerprogrammen grundlegende Erkenntnisse über die Struktur der menschlichen Intelligenz zu gewinnen. "The central goals of Artificial Intelligence are to make computers more useful and to understand the principle which make intelligence possible" (6).

In KI-Kreisen wird ein dramatischer Effekt dieser "intelligent technology" (7) auf die gegenwärtige Gesellschaftsstruktur angenommen, der überwiegend positiv gewertet wird. So nimmt man an, daß nicht nur enorme Arbeitserleichterungen durch die neuen Maschinen erzielt werden, sondern darüberhinaus die menschliche Intelligenz bereichert werden könne. Eine besonders euphorische Position spiegelt sich in der folgenden Aussage Winston's wieder: "One result of this new point of view may be new ideas about how to help people become more intelligent. Just as psychological knowledge about human information processing can help make computers intelligent, theories derived purely with computers in mind often suggest possibilities for how to educate people better. Said another way, the methodology involved in making smart computer programs, may transfer to making smart people" (8). Die hier offenbar werdende Haltung, hinter der sich die Auffassung verbirgt, daß Maschinen und Menschen insofern als vergleichbar zu betrachten sind, als beide der Gattung informationsverarbeitender Systeme angehören (9), stellt eine weitverbreitete Grundüberzeugung innerhalb der KI-Forschung dar. In den folgenden Kapiteln tritt diese Auffassung immer wieder zutage und markiert so eine der wissenschaftstheoretischen Grundannahmen, die für weite Teile der Künstlichen Intelligenz als typisch erachtet werden können.

1.1.3 Geschichte der KI-Forschung

Als Geburtsstunde der Künstlichen-Intelligenz-Forschung wird häufig die Dartmouth Konferenz genannt, die 1956 in New Hamphire stattfand (10). Der Begriff der Künstlichen Intelligenz wird auf John McCarthy zurückgeführt, einem der Begründer dieses Forschungszweiges und Erfinder der wichtigsten KI-Programmiersprache, LISP. Die eigentliche Grundlage der Künstlichen Intelligenz stellt jedoch die weitreichende Entwicklung der mathematischen Logik zu Beginn sowie in den dreißiger und vierziger Jahren dieses Jahrhunderts dar, insbesondere durch Tarski, Russell und Whitehead. Die Erkenntnis, daß sich manche Aspekte von logischen Denkprozessen, vor allem die logische Schlußfolgerung, durch formalisierte Strukturen darstellen lassen, bot den KI-Forschen überhaupt erst die theoretische Grundlage für die angestrebte Simulation intelligenter Denkprozesse mit Computern, da sie auf die Konzepte logisch-deduktiver Systeme zurückgreifen konnten.

Eine mindestens ebenso entscheidende Rolle für die Entstehung der Künstlichen Intelligenz hatte der Mathematiker Turing, der nicht nur als einer der ersten die Möglichkeit maschineller Intelligenz mit Computern erwog, sondern darüberhinaus die wesentliche Einsicht hatte, daß die Programmierung von Computern als Symbolisierungsprozeß aufzufassen sei. Computerprogramme seien demnach nicht nur durch den Binärcode zu erstellen, wie dies für die damals verbreiteten, ersten Computer zutraf, sondern es seien theoretisch auch andere Formen der Programmierung, etwa höhere Programmiersprachen, denkbar, deren Abstraktionsniveau es möglich erscheinen ließ, die äußere Welt und die menschlichen Denkfähigkeiten zumindest in Teilbereichen zu simulieren. Diese Annahme Turings stellt eine der wichtigsten Erkenntnisse für die Entwicklung der Künstlichen Intelligenz dar.

Daneben spielte wohl auch der Zeitgeist eine entscheidende Rolle für die manifest werdende Idee einer maschinellen Intelligenz. In diesem Zusammenhang sind die Kybernetiker Wiener und McCulloch zu nennen, deren Bemühungen um die Synthese von Informations- und Kontrolltheorie, Logik und Computerwissenschaften sowie deren Bezugsetzung zum menschlichen Nervensystem eine wichtige Funktion hatte für die Idee maschineller Intelligenz und deren Realisierung mithilfe von Computern. Die Determination des Testes von Turing, ab wann ein Computer als intelligent zu gelten habe, die Idee Shannons, ein Computerprogramm zu konzipieren, das Schach spielen kann, die Spekulation Wieners und von Neumanns über die Isomorphie der Informationsverarbeitung von Menschen und Maschinen sowie eine Reihe von Publikationen als Antizipation von Computerintelligenz, all dies schuf eine intellektuelles Klima, in dem die Künstliche Intelligenz entstehen konnte.

Die ersten Versuche zur Entwicklung intelligenter Maschinen basierten auf Experimenten von Computerwissenschaftlern, die ihre Computer nicht mehr ausschließlich für Rechenoperationen benutzten, sondern damit begannen, erste "intelligente" Programme zu entwickeln; zu diesen zählten Schachprogramme, Puzzle-Lösungsprogramme und Textübersetzungsprogramme. Diese ersten Programme waren jedoch nach sehr einfachen Algorithmen konzipiert, d.h. sie stellten keine qualitative Änderung gegenüber den allgemein verbreiteten Computerprogrammen dar. Die sich bereits bei diesen vermeintlich einfachen Aufgaben offenbarende Komplexität Intelligenz erfordernder Problemstellungen führte schon bald zu der Einsicht, daß mit den herkömmlichen Methoden keine wirklich intelligenten Programme zu schaffen seien. Erst durch Nachahmung der menschlichen Form der Problembewältigung, die sich augenscheinlich als sehr viel leistungsfähiger erwies, so glaubte man, könne die Zielsetzung maschineller Intelligenz realisiert werden. Dies erforderte jedoch eine gründliche Analyse der Struktur menschlicher Intelligenz, um deren Simulation mit Computern verwirklichen zu können. "The realisation that the detailed steps of almost all intelligent human activities were unknown marked the beginning of Artificial Intelligence as a separate part of computer science" (11).

1.1.4 Inhaltliche Abgrenzung der Künstlichen Intelligenz

Die Struktur von KI-Programmen und die ihnen zugrundeliegende Methodologie unterscheiden sich in einigen wesentlichen Punkten von den allgemein verbreiteten Computerprogrammen. Während übliche Programme stets auf eine spezielle Aufgabe zugeschnitten sind und auf ausschließlich problemspezifischen Algorithmen beruhen, bemüht man sich in der KI-Forschung um die Konzeption von Programmen, deren Lösungsmuster so allgemein wie möglich sind und die sich damit für unterschiedliche Aufgaben anwenden lassen. "AI programs are designed to be as general purpose as possible" (12). Dieser Ansatz impliziert eine Loslösung von der Step-by-step - Methode der ehemaligen Algorithmenkonzeption, die sich durch eine stets vollständige Eingabe der Problemlösung bis ins letzte Detail, d.h. durch ein streng vorgegebenes, determiniertes Lösungsmuster kennzeichnen läßt; "the method must be specified in complete detail" (13). Diese algorithmische Form der maschinellen Problemlösung wird in Programmen der KI-Forschung abgelöst durch eine heuristische Herangehensweise. Man bemüht sich, die maschinellen Problemlösungsstrategien analog dem menschlichen Problemlösungsverhalten zu konzipieren, indem versucht wird, die Heuristiken oder Faustregeln herauszufinden, mit denen Menschen die verschiedensten Probleme rasch und effizient lösen. Die Zielsetzung, durch die Simulation menschlicher Fähigkeiten Computerprogramme zu höheren Leistungen zu befähigen, unterscheidet die KI-Programme von herkömmlichen und bedingt die Entwicklung von neuen Programmen, die universeller anwendbar sind, über generellere Problemlösungsstrategien verfügen und eine Aufgabenbewältigung weitgehend unabhängig vom Benutzer vornehmen können.

Die enge Orientierung an der menschlichen Form der Problemlösung impliziert weitere wesentliche Unterschiede: während übliche Programme meist so konzipiert sind, daß sie für alle möglichen

Fälle eine Lösung beinhalten und zudem stets nach der optimalen suchen, werden in der KI-Forschung menschliche Verfahrensweisen imitiert, d.h. aus Zeitersparnisgründen annähernd optimale Lösungen eines Problems akzeptiert, Fehler in Kauf genommen, sofern diese das Endresultat nicht beeinträchtigen, und statt für alle denkbaren lediglich für vernünftige oder statistisch wahrscheinliche Fälle Lösungen parat gehalten. "AI workers concentrate on the more fallible but paradoxically more successful techniques employed by humans, although AI doesn't spurn algorithms when practical ones exist for the problem at hand" (14). Somit ersetzt die KI-Forschung die in ihrer Ausführung oftmals zeitaufwendigen, streng problemspezifischen Algorithmen allgemeiner Computerprogramme durch heuristische, dem menschlichen Problemlösungsverhalten nachempfundene Strategien, die sich als flexibler, leistungsfähiger und universeller erwiesen, da die Verknüpfung von fachlichem Wissen und generellen Heuristiken ihre Anwendung auch bei anderen als dem konkreten Problem erlaubt.
Feigenbaum und McCorduck (15) charakterisieren den Unterschied zwischen den bisherigen Computerprogrammen und KI-Systemen, die in diesem Kontext als "Computer der Fünften Generation" bezeichnet werden, als qualitative Differenz; sie bezeichnen dies als "the transition from information processing to knowledge processing, from computers that calculate and store data to computers that reason and inform" (16).

Die bislang vornehmlich als Rechner oder Datenspeicher fungierenden Computersysteme werden so durch die Einflüsse der Künstlichen Intelligenz zunehmend abgelöst werden durch eine neue Ära von Maschinen, die über ausgedehnte Wissensbasen verfügen und logische Ableitungen vornehmen können.

Resümierend markieren also folgende Faktoren den Unterschied zwischen herkömmlichen Programmen und KI-Programmen:
- die Implementation einer Wissensbasis über ein engbegrenztes Fachgebiet;
- die Integration genereller Heuristiken, durch die menschliche Problemlösungsstrategien maschinell simuliert werden;
- die Entwicklung nichtdeterministischer Problemlösungsmethoden, die eine Ablösung des algorithmischen Programmierprinzips verdeutlichen, jedoch mit dem Risiko behaftet sind, daß überhaupt keine Lösung eines Problems gefunden wird.

Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß sich die aufgezeigten Unterschiede zunehmend verwischen als Folge eines immer größer werdenden Einflusses der KI-Forschung auf die allgemeinen Computerwissenschaften.

1.1.5 Institutionalisierung

Die Ursprünge der Künstlichen Intelligenz-Forschung liegen in den USA; hier wurden an mehreren Universitäten die ersten KI-Institute gegründet. Finanziert wurde der größte Teil der Forschung durch das amerikanische Verteidigungsministerium, genauer durch die Forschungsfinanzierungsinstanz DARPA (17). Anfänglich vornehmlich an Universitäten gebunden, entstanden im Laufe der siebziger Jahre immer mehr außeruniversitäre Forschungs- institute, die zum Teil von großen Computerfirmen finanziert wurden und an denen immer mehr hochqualifizierte KI-Forscher beschäftigt sind. Diese universitätsexternen Forschungszentren spielen heute eine nicht minder entscheidende Rolle in der KI-Forschung als die traditionellen Universitäten; sie zielen nicht nur auf die Erprobung neuer Methoden und auf die Konzipierung leistungsfähiger Systeme, sondern sind zudem sehr an der Erprobung der entwickelten Systeme in der Praxis und an der wirtschaftlichen Verwertung ihrer Produkte interessiert.

Gegenüber dieser eindeutigen Vormachtstellung der USA stehen Nationen außerhalb Nordamerikas hintan. Obwohl in Europa erst allmählich die Bedeutung der Künstlichen Intelligenz erkannt wird, abgesehen vielleicht von Großbritannien, wo schon seit längerem der Anschluß an die USA gesucht wird, ist doch zu beobachten, daß sich auch innerhalb Europas immer mehr Universitäten und Computerfirmen um Grundlagenforschung und die Entwicklung wirtschaftlich verwertbarer Systeme kümmern. Japan versucht durch sein groß angelegtes Projekt "Fifth Generation Computer" den Forschungsvorsprung der USA aufzuholen. In diesem Projekt, das von Seiten der USA äußerst ernst genommen wird(18), steht die Entwicklung wissensbasierter, schlußfolgernder Computersysteme im Mittelpunkt; unterstützt wird dieses Vorhaben durch eine finanzielle Förderung von jährlich etwa 100 Millionen Mark (19).

1.1.6 Entwicklung von unterschiedlichen "Schulen"

Die anfängliche Euphorie der nordamerikanische KI-Forscher :n den fünfziger Jahren, die im

Erfolg der ersten Programme begründet lag, wurde, wie oben bereits angedeutet, schon bald von der realistischen Einsicht abgelöst, daß die ursprünglichen hoch- gesteckten Ziele angesichts der Komplexität der Aufgaben nur mühsam zu erreichen seien.
Angesichts der ersten Resultate ließen sich viele KI-Forscher zu Voraussagen hinreißen, die sich kurze Zeit später bereits als kaum erfüllbar erwiesen. Die neue Forschungsrichtung weckte sc anfangs bei Wirtschaft, Industrie und in akademischen Kreisen hohe Erwartungen. Als diese sich als nicht realisierbar erwiesen, zumindest in dem zunächst angenommenen Zeitraum, schwand bei vielen das Interesse an der Künstlichen Intelligenz und die KI-Forscher sahen sich nunmehr lediglich vom Verteidigungs- ministerium und von einigen medizinischen Forschungseinrichtungen unterstützt. Diese frühen Rückschläge erschwerten die Bemühungen um eine breitere Resonanz der KI-Forschung und ließen sie lange ein akademisches Randgebiet bleiben. Trotz dieser frühen Widrigkeiten stabilisierte sich der Status der Künstlichen Intelligenz innerhalb der Computer-wissenschaften zunehmend. Nicht nur wurden immer mehr Forschungsinstitute gegründet, sondern es bildeten sich im Zuge der Zeit sogar wissenschaftliche Schulen, die jeweils differente Positionen innerhalb der KI-Forschung vertraten.

Es lassen sich global vier Schulen unterscheiden mit unterschiedlichen Schwerpunkten und divergierenden philosophischen Positionen. Die älteste Schule verbindet die eigenen Zielvorstellungen nur selten mit dem Begriff der Künstlichen Intelligenz. Ihre Mitglieder sind Pragmatiker, Ingenieure und Techniker. Sie lösen ihre Aufgabenstellungen mit unterschiedlichsten Methoden und beurteilen ihre Konzepte nicht anhand einer verbindlichen Methodologie, sondern lediglich nach dem Erfolg, den ihre Systeme erzielen. Ein theoretisches Fundament der Programmierung fehlt völlig, ja die Suche nach fundamentalen Prinzipien wird als überflüssig erachtet, solange die praktizierten Methoden erfolgreich sind. Vertreter dieser Schule sind vornehmlich in der Industrie tätig oder arbeiten in akademischen Disziplinen, die stark ingenieurwissenschaftlich ausgerichtet sind.

Die zweite zu differenzierende Richtung innerhalb der KI-Forschung hat eine ebenso pragmatische Zielrichtung, bemüht sich jedoch mehr um die Analyse grundlegender mathematischer Prinzipien und Theorien in der Erwartung, so eine theoretische Basis zu finden für eine mögliche Generalisierbarkeit der entwickelten Systeme und strebt darüberhinaus eine allgemeine wissenschaftliche Anerkennung an. Die Wurzeln dieser Schule liegen bei Shannon und der Informationstheorie; das Massachussetts Institut of Technology gilt als einer der Hauptvertreter dieser Richtung. Hervorstechend ist die enge Verbindung zur Mathematik und die Suche nach brillanten Lösungen von Problemen. Dies bewirkt, daß Programme, die nach der "brute-force-Methode" entwickelt wurden, scharf kritisiert und nicht unter zur Künstlichen Intelligenz gezählt werden.

Die dritte Schule läßt sich auf Wiener zurückführen, insbesondere auf sein Interesse an der Beziehung zwischen Bewußtsein und Maschine. Entsprechend bemühen sich Forscher dieser wissenschaftlichen Richtung um die Entwicklung von Theorien und die Erforschung grundlegender Prinzipien der menschlichen Intelligenz, um diese oder zumindest Teilaspekte maschinell simulieren zu können. Der akademische Führer der Gruppe ist Simon (20); die Carnegie-Mellon-University gilt als Hauptsitz dieser Schule. Wissenschaftler dieses Zweiges werten nur solche Computersysteme als der Künstlichen Intelligenz zugehörig, die eine Parallelität oder einen engen Bezug zur menschlichen Intelligenz aufweisen, wie überhaupt vorrangiges Ziel die Konzeption von Programmen ist, die dem menschlichen Denken analog sind.

Der Erfolg eines Programms wird nur zum Teil danach beurteilt, ob eine Aufgabe gut gelöst wurde; mindestens ebenso wichtig für die Bewertung ist die Tatsache, daß eine klare Beziehung existieren muß zwischen der maschinellen und der menschlichen Problem- bewältigung. Diese Zielsetzung stellt einen Anreiz dar für Philosophen, Psychologen und Neurophysiologen, die hier wesentliche Erkenntnisse über die Struktur der menschlichen Intelligenz zu gewinnen hoffen. Die Künstliche Intelligenz - Forschung und die Kognitionspsychologie wirken hier eng zusammen. Als letzte, gegenwärtig weit verbreitete Richtung innerhalb der KI-Forschung ist die Schule zu nennen, die sich vor allem der angewandten Logik verschrieben hat. Nilsson (21) und Feigenbaum(23) gelten als Hauptvertreter dieser Richtung, deren wissenschaftliches Zentrum die Stanford University und das Stanford Research Institute (SRI) sind. Hier bemüht man sich um die Entwicklung sogenannter Produktionssysteme (24) und versucht, auf der Grundlage des Prädikatenkalküls Wissen darzustellen und Schlußfolgerungen über neues Wissen zu ermöglichen. Nur solche Programme werden als KI-Programme betrachtet, die entweder auf der Basis der symbolischen Logik erstellt wurden oder aber eine enge Beziehung zu dieser beinhalten. Gerade in den letzten Jahren jedoch hat sich die Trennung zwischen den Schulen merklich verwischt. Grundsätzlich lassen sich womöglich nur noch zwei Hauptrichtungen klar unterscheiden:

- die Richtung, die sich um die Entwicklung leistungsfähiger Maschinen bemüht und sich dazu der verschiedensten Methoden bedient;
- die Schule, in der die maschinelle Simulation menschlicher Fähigkeiten sowie der damit einhergehende Erkenntnisgewinn über die menschliche Intelligenz im Vordergrund des Interesses stehten.

Die zukünftigen Entwicklungen der Künstlichen Intelligenz werden zeigen, inwieweit sie eine verbindliche Methodologie und ein einheitliches Theoriekonzept entwickeln wird und damit überhaupt erst die Basis schafft für ihre Etablierung als klar abzugrenzender Wissenschaftszweig.

1.1.7 Forschungszweige

Die Komplexität der Zielsetzung, intelligente Maschinen zu entwickeln bzw. menschliche Intelligenz mit Computern zu simulieren, erforderte eine Aufteilung der KI-Forschung in verschiedene, voneinander zumindest teilweise trennbare Forschungszweige. Die Auflistung der Bereiche, die unter dem Begriff der Künstlichen Intelligenz subsummiert werden, variiert unter den Autoren. Hier wird deshalb exemplarisch Bezug genommen auf die achte internationale Konferenz über Künstliche Intelligenz (International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI) (25), auf der die folgenden Forschungs- schwerpunkte getrennt vertreten waren. Zu unterscheiden sind dabei generell diejenigen Bereiche, in denen eine Form von Grundlagenforschung betrieben wird, von Forschungszweigen, in denen Programmiermethoden weiterentwickelt werden, und von Bereichen, die auf die Konzeption praktisch anwendbarer Systeme zielen.

1. "Planning and Search": Dieser Zweig umfaßt die Entwicklung von effizienten Suchstrategien, die heuristischen Prinzipien folgen, sowie die Konzeption von Planungsprozessen für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche. Dieser Bereich zählt zur Grundlagenforschung und hat damit in verschiedenen anderen Forschungsgebieten unmittelbaren Einfluß.

2. "Knowledge representation": dieser Forschungsschwerpunkt zählt ebenfalls zum Bereich der Grundlagenforschung. Er zielt auf die Konzeption von Repräsentationsstrukturen, mit denen die Implementation von Wissen in Computer realisiert werden kann. Darüberhinaus werden Methoden entwickelt, wie der Umgang mit unsicherem Wissen in Computersysteme integriert werden kann und welche Strategien anwendbar sind, um neues Wissen aus altem abzuleiten.

3. "Learning and knowledge aquisition": auch dieser Bereich kann zur Grundlagenforschung gerechnet werden; es handelt sich um einen relativ jungen Forschungszweig, in dem Methoden entwickelt werden, die Programme zu Lernprozessen befähigen. Dabei wird eine größtmögliche Unabhängigkeit vom Benutzer angestrebt, d.h. die Computersysteme sollen eigenständig neues Wissen erwerben und dieses sinnvoll mit dem schon vorhandenen Wissen kombinieren.

4. "Automatic Programming": hier werden Systeme entworfen, die nach vorgegebenen Problemstellungen benutzerunabhängig eigene Programme entwickeln können.

5. "Logic Programming": Entsprechend der großen Bedeutung der formalen Logik wird innerhalb dieses Forschungszweiges die Entwicklung von Programmiermethoden vorangetrieben, die auf der klassischen Logik basieren. Dies bezieht sich insbesondere auf die Weiterentwicklung der KI-Programmiersprache PROLOG, die neben LISP als vorrangig angewandte Sprache in der Künstlichen Intelligenz gilt.

6. "Theorem Proving": eng verknüpft mit der logischen Programmierung ist die Entwicklung von Theorem-Beweisersystemen, d.h. Programmen, die benutzerunabhängig mathematische Beweisführungen vornehmen können.

7. "Natural Language": dieser Forschungsbereich beinhaltet die Erforschung und Konzeption natürlichsprachlicher Systeme. Zur Verbesserung der Mensch- Maschine-Interaktion sollen Computer- programme zum Sprachverständnis und zur Sprachgenerierung befähigt werden, um dem menschlichen Benutzer die Kommunikation mit der Maschine in seiner normalen Alltagssprache zu ermöglichen. Entwickelt wurden bislang verschiedene Konzepte, wie Frage- und Antwort-Systeme, textverstehende Programme, Text- übersetzung-Programme sowie Systeme, die gesprochene Sprache produzieren und verstehen (26). Die Erforschung der maschinellen Möglichkeiten, mit der natürlichen Sprache umzugehen, zielt auf die Integration entsprechender Resultate in Computerprogramme, um diese komfortabler und menschengerechter zu gestalten. Mit dem Abbau der sonst

üblichen Sprachbarriere zwischen Mensch und Maschine erhofft man sich, die allgemeine Anwendbarkeit und Verbreitung von Computerprogrammen zu vergrößern und zu bewirken, daß die System "would fit more naturally into people's lives" (27). Das Bemühen, sprachverstehende oder sprachproduzierende Programme zu entwickeln, impliziert die Erforschung der grundlegenden Prozesse, die für die menschliche Sprache relevant sind. Die Simulation des menschlichen Sprachverständnisses beispielsweise spielt hier eine entscheidende Rolle, wie überhaupt der Bezug zu linguistischen Theorien einen hohen Stellenwert einnimmt.
8. "Vision": Der Forschungsschwerpunkt 'bildverstehende Programme' beinhaltet das Bemühen, Computer nicht nur zur Verarbeitung von visuellen Reizen zu befähigen, sondern ihnen darüberhinaus ein Verständnis dieser Reize zu ermöglichen. Dies bedeutet, daß bildverstehende Computersysteme optische Reize bestimmten Konzepten oder spezifischen symbolischen Bedeutungen zuordnen und beispielsweise oberflächlich ähnliche Objekte als unterschiedlich klassifizieren können. Die maschinelle Interpretation visueller Eindrücke setzt eine genaue Analyse der menschlichen Wahrnehmungsprozesse voraus, so daß in diesem Forschungsbereich Aspekte der maschinellen Simulation kognitiver menschlicher Fähigkeiten eine wichtige Rolle spielen.

9. "Expert Systems": die Entwicklung von Expertensystemen zählt zu den Bereichen innerhalb der KI-Forschung, mit denen bislang die größten Anwendungserfolge erzielt werden konnten. Die maschinelle Verankerung von Expertenwissen und die darauf basierende fachspezifische Problemlösung auf Expertenniveau durch Computer stellt einen der Bereiche dar, in dem der Künstlichen Intelligenz der Sprung aus den Laboratorien gelang. In verschiedenen Anwendungsbereichen, vor allem in den Natur- wissenschaften und in der Medizin, wurden leistungsfähige Programme entwickelt, die komplexe Aufgaben in engbegrenzten Fachgebieten lösen können und dabei eine Erfolgsquote aufweisen, die der von Experten vergleichbar ist.

10. "Cognitive Modelling": dieser Forschungszweig beinhaltet die am weitesten gefaßte Zielsetzung, nämlich die Simulation der kognitiven Fähigkeiten des Menschen. Er ist unmittelbar verknüpft mit der Kognitionswissenschaft ("Cognitive Science") (28), wo eine Theoriebildung über die menschliche Kognition auf der Basis von Computermodellen erfolgt. Die enge Kooperation mit der Philosophie, der Psychologie und der Neurologie ist für diesen Sektor charakteristisch; beinhaltet er doch die umfassendste Fragestellung der Künstlichen Intelligenz überhaupt. Die Zielsetzung, grundlegende Erkenntnisse über die Struktur der menschlichen Intelligenz durch deren maschinelle Simulation zu gewinnen, ist dieser Problemstellung immanent. Eine große Zahl dieser Forscher geht dabei von der Annahme aus, daß Mensch und Maschine hinsichtlich der Art ihrer Informationsverarbeitung vergleichbar seien. Die Anwendungsebenen sind entsprechend der weitgefaßten Fragestellung sehr mannigfaltig, wobei ein besonderes Augenmerk auf das Gedächtnis, das Sprachverständnis, die Problemlösungsfähigkeiten und auf Wahrnehmungsprozesse gelegt wird.

11. "Robotics": dieser, nur bedingt zur Künstlichen Intelligenz zu rechnende Forschungszeig(29) zielt auf die Entwicklung von Robotern, die zu benutzerunabhängigen Aktionen in der Lage sind. Dies impliziert die Integration von planenden und und problem- lösenden Programmen in Roboter, die damit in gewißem Masse eigenständige Operationen vornehmen können.

Die in den oben dargestellten Forschungsgebieten der Künstlichen Intelligenz erzielten Erfolge stellen sich, abhängig von der Komplexität des Bereichs, sehr unterschiedlich dar. Während beispielsweise in den Bereichen Expertensysteme und Robotics nennenswerte Resultate erzielt wurden, die bereits wirtschaftliche Anwendung fanden, kämpft man bei der maschinellen Sprachverarbeitung und bei Versuchen, kognitive Fähigkeiten maschinell zu simulieren, mit schier unüberbrückbaren Schwierigkeiten.
Insgesamt hat die KI-Forschung weniger spektakuläre Resultate erzielt als vielmehr eine Fülle effizienter Programmprinzipien entwickelt, die in weiten Bereichen der Computertechnologie bereits Anwendung finden oder finden werden. Beispielsweise haben die in der KI-Forschung entwickelten Konzepte zur Wissens- repräsentation Einfluß genommen auf allgemein verbreitete Datenbankprogramme (30).

Ein Bereich, in dem viele Methoden der Künstlichen Intelligenz vereinigt wurden und der in naher Zukunft eine weitreichende Bedeutung gewinnen wird, ist die Konzeption von Expertensystemen. Erkenntnisse aus den Forschungszweigen Wissens-repraesentation° sowie Such- und Planungsprozeduren fanden hier eine konkrete Umsetzung ebenso wie Prinzipien der maschinellen Sprachverarbeitung. Expertensysteme sind darüberhinaus die ersten Systeme, die außerhalb der KI-Laboratorien eingesetzt werden und die mittlerweile so kostengünstig verfügbar sind, daß ihre Verbreitung in nächster Zukunft zu erwarten ist. Feigenbaum und Mc Corduck (31) bezeichnen diese Computersysteme als die Pilot- projekte einer neuen Computerära (32), da sie nicht nur ein

effektive Kombination von sogenanntem Textbuchwissen und in Regeln formalisiertem Erfahrungswissen aufweisen, sondern darüberhinaus über Schlußfolgerungsfähigkeiten verfügen, die sie zu komplexen Problemlösungen befähigen. Damit entsprechen Expertensysteme den Kriterien, die für die kommende Computergeneration formuliert wurden: daß Computer nicht länger als bloße Datenspeicher oder Rechenmaschinen fungieren, sondern infolge ihrer Fähigkeit, Symbole zu handhaben, über Wissen verfügen und Inferenzen ziehen können sollen.
Die Bedeutung, die den Expertensystemen gemäß dieser Perspektive schon bald zukommen wird, rechtfertigt die Selektion der Bereiche innerhalb der Künstlichen Intelligenz, die in der Folge ausführlich dargestellt werden:
- die Repräsentation von Wissen,
- Suchprozeduren und Problemlösungsmethoden,
- Expertensysteme.

1.1.8 Gesellschaftliche Verbreitung der Künstlichen Intelligenz

Bei der Einschätzung der zukünftigen Verbreitung dieser neuen Computersysteme, " machines that, in some limited sense, reason" (34), muß berücksichtigt werden, daß nicht nur eine schnelle Entwicklung der Hardware und Software zu erwarten ist, sondern daß die Systeme auch immer kostengünstiger hergestellt werden können. Mit der rapidem Abnahme der Kosten für Speicherchips, wie sie vor allem in den letzten Jahre zu beobachten war, und der Implementation von Software—Tools auf Personal-Computern, d.h. von Programmpaketen, die beispielsweise die Verfügbarkeit eines Expertensystems auf Kleinrechnern ermöglichen, sind zwei wesentliche Faktoren beseitigt, die zu den bisherigen Barrieren einer weiteren Verbreitung von KI-Systemen zählten. Feigenbaum und Mc Corduck (35) charakterisieren diese Entwicklung als "halving in price and doubling in power every two years on the average".
Darüberhinaus entsteht von Seiten der Industrie, aber auch innerhalb der Universitäten eine ständig zunehmende Bereitschaft, Forschungsprojekte im Rahmen der Künstlichen Intelligenz zu fördern, so daß auch im Software- Bereich eine wachsende Zahl an Spezialisten zu finden sein wird.

Die so im Zusammenhang mit der Künstlichen-Intelligenz-Forschung entstehenden Computersysteme, auch als "KIPS - Knowledge Information Processing Systems" bezeichnet, werden eine Wende in der Computertechnologie einleiten. "It signals the shift from mere data processing, which is the way present-day computers function, to an intelligent processing of knowledge" (36). Zukünftige Systeme basieren also in hohem Maße auf Programmier- prinzipien, die im Rahmen der Künstlichen—Intelligenz-Forschung entwickelt wurden. Die oben aufgezeigte Beseitigung bislang existierender Hemmnisse wird dazu führen, daß die Künstliche Intelligenz nicht länger ein oftmals belächeltes Schattendasein führen (37), sondern das Fundament der zukünftigen Computer- technologie darstellen und damit einen weitreichenden Einfluß in den unterschiedlichsten gesellschaftlichen Bereichen gewinnen wird.

1.2 Theoretische Aspekte der Künstlichen Intelligenz

1.2.1 Einleitung

Die Künstliche-Intelligenz-Forschung, obwohl mittlerweile seit ca. dreißig Jahren existierend, gilt immer noch als relativ junge Wissenschaft. Infolgedessen sind bislang weder allgemein verbindliche theoretische Modelle konzipiert noch eine abgrenzbare Methodologie dieser Disziplin entwickelt worden (38). Viele KI-Forscher vertreten die Ansicht, daß es noch zu früh sei, die diffusen theoretischen Vorstellungen in einem einheitlichen Theoriekonzept zu konkretisieren, da die Künstliche Intelligence sich noch im Anfangsstadium befinde. Dennoch lassen sich einige grundlegende methodische Ansätze finde, die als weitgehend verbindliche Prinzipien der KI-Forschung betrachtet werden können.

1.2.2 Der Intelligenzbegriff in der KI-Forschung

Die Unklarheit der Begriffsbenutzung in der Künstlichen Intelligenz offenbart sich bereits bei den Beschreibungsversuchen zur Intelligenz. So werden in der KI-Forschung häufig eine Reihe von Eigenschaften aufgezählt, die mit dem Intelligenzbegriff assoziiert werden; Barr/Feigenbaum etwa nennen folgende Fähigkeiten: "understanding language, learning, reasoning, solving problems" (39). In anderen Fällen vertritt man eine operationale Definition von Intelligenz, indem auf den sogenannten TURING-Test von 1950 verwiesen wird, nach dem eine Maschine dann als intelligent zu gelten habe, wenn ein menschlicher° Gesprächspartner bei einem Telefongespräch

mit der Maschine nicht° mehr entscheiden kann, ob es sich bei seinem Gegenüber um einen Menschen oder um eine Maschine handelt(40). Minsky (41) zählt folgende Fähigkeiten zu den Charakteristika von Intelligenz: Unterziele zu schaffen, hierarchische Objektverknüpfungen vorzunehmen, kausale Symbolverknüpfungen bilden zu können, über ein Gedächtnis zu verfügen, Erfahrungen über ähnliche Probleme zu sammeln, mit eigenen Ressourcen ökonomisch umzugehen, Prozesse zu planen und über Selbsteinsicht zu verfügen. Hier wird deutlich, wie das Bemühen um eine Realisierung maschineller Intelligenz in das Verständnis über die menschliche Intelligenz einfließt, d.h. wie die aufgezählten Fähigkeiten jene Bereiche umfassen, in denen im Rahmen der KI- Forschung bereits Teilerfolge erzielt wurden.

Eine kritischere Position wird beispielsweise von Hofstadter (42) vertreten, der den Intelligenzbegriff sehr viel weiter faßt. Für ihn umfaßt Intelligenz vor allem das Vermögen, Neues zu erdenken, seien es Begriffe, Ideen oder Strategien. Das Erfassen von Mehrdeutigkeiten und die flexible Anpassung an unbekannte Situationen zählen hier ebenso dazu wie die Fähigkeiten, "trotz trennender Unterschiede Ähnlichkeiten zwischen Situationen" zu "finden" und "trotz Ähnlichkeiten, die sie zu verbinden scheinen, zwischen Situationen unterscheiden" (43) zu können. Allerdings geht er davon aus, daß der hier apostrophierten Beweglichkeit von Intelligenz eine seh große Anzahl von Regeln zugrunde liegt, d.h. die Komplexität des Denkens grundsätzlich durch Regeln erklärt werden kann. Stereotype Reaktionen basieren dieser Auffassung nach auf sehr simplen Regeln, während kreative Intelligenz Regeln voraussetzt, die ihrerseits neue Regeln schaffen können. Die hier deutlich werdende Überzeugung, daß sich intelligentes Verhalten auf formale Regeln zurückführen läßt und damit auch prinzipiell auf Computer übertragen werden kann, wird in späteren Kapiteln noch ausführlicher problematisiert werden. Hier soll lediglich die innerhalb der KI-Forschung vorherrschende Auffassung dokumentiert werden, nach der jede noch so komplex oder undurchschaubar scheinende geistige Tätigkeit des Menschen als formalisierbar begriffen wird und es lediglich darum geht, die zugrundeliegenden Strukturen der menschlichen Intelligenz zu erforschen, um eine Form maschineller Intelligenz zu schaffen, die der des Menschen ähnlich ist.

Die Zielsetzung, intelligente Maschinen zu konstruieren, setzt also eine genauere Erforschung des allgemein als intelligent geltenden Verhaltens bei Menschen voraus. Wie bereits oben beschrieben, führten schon die ersten Ansätze zu der Einsicht, daß die menschliche Intelligenz völlig unzureichend erforscht war; darüberhinaus erkannte man, daß die alltäglichen Fähigkeiten eines Menschen erheblich komplexer sind, als man ursprünglich angenommen hatte. So stellte sich die Simulation des menschlichen Sprachverhaltens oder der sinnvollen Verarbeitung von Seheindrücken als erheblich schwieriger heraus als etwa die Konzeption eines Programms zur mathematischen Beweisführung. Der bisher überwiegend auf Abstraktions- und Formalisierungsfähigkeit gerichtete Intelligenzbegriff erfuhr so eine Revidierung. "All the elegantly structured symbolic artifacts that we think make us most human, such as mathematics and logic and the ability to splice genes or infer the underground geological facts from instruments, are what computers handle best,because the more highly strucured knowledge is the easier it is for us to codify it for computer use." (Feigenbaum-McCorduck, S.57).

Auch die anfängliche Annahme der KI-Forscher, daß sich intelligentes Verhalten auf einige grundlegende Prinzipien zurückführen lasse, so daß diese nur auf den Computer übertragen werden müßten, um eine intelligente Maschine zu schaffen, mußte revidiert werden. Zunehmend erkannte man, daß es sich bei der menschlichen Intelligenz um ein derart komplexes Gefüge an Fähigkeiten handelt, daß sich lediglich isolierte Teilbereiche der menschlichen Fähigkeiten, wie etwa bestimmte logische Denkoperationen, als formalisierbar und damit auf Computer übertragbar erwiesen.

1.2.3 Das Theorieverständnis in der KI-Forschung

Die ohnehin nur rudimentär vorhandenen theoretische Ansätze in der KI- Forschung sind in erster Linie pragmatischer Natur. So ist der Auffassung Weizenbaums (44) zuzustimmen, nach der die Theorie zunächst als Mittel zum Zweck begriffen wird, d.h. als Instrument zur Entwicklung leistungsfähiger Computersysteme. Dieses operationale Theorieverständnis bedingt eine vorwiegend am Gebrauchswert orientierte Einschätzung der unterschiedlichen Konzepte. "Letzten Endes entscheidet immer die Brauchbarkeit eines Ansatzes bei der praktischen Computersimulation über seine Lebensfähigkeit in der Diskussion" (45). Die deutliche Orientierung an der Effizienz von Theorie bedingt das mangelnde Bemühen um eindeutig und einheitlich angewandte Begriffe und scheint verantwortlich zu sein für das Fehlen theoretischer Konzepte bei der Programmentwicklung und für die häufigen Widersprüche und Unklarheiten in der Methodologie.

Neben diesem weit verbreiteten Pragmatismus existieren auch andere Positionen; so betonen beispielsweise Sloman (46) sowie Newell und Simon (47) die Bedeutung der Künstlichen Intelligenz für die Theoriebildung über menschliche Intelligenz und menschliches Bewußtsein. Hierbei wird hervorgehoben, daß Computersysteme ideale Forschungsobjekte seien: "They exhibit unlimited patience, they require no feeding, and they do not bite" (48). Mit dieser etwas sonderbar wirkenden Argumentation wird die Auffassung vertreten, daß Programmteile eliminiert werden können, ohne daß dabei Lebewesen geschädigt werden, so daß die Theoriebildung über menschliches Verhalten und menschliche Kognition durch den Einsatz von Computern erleichtert werde. Computer erscheinen hier als Systeme, mit denen die Überprüfung theoretischer Modelle vorgenommen werden kann, da die Konzeption und Anwendung theoretisch äquivalenter Computerprogramme mit einer 'praktischen' Erprobung dieser Modelle gleichzusetzen sei. Diese Form der Theoriebildung wird beispielsweise in der Kognitionspsychologie als valide erachtet.

Die grundsätzliche Frage, inwieweit Computer als Systeme ohne einen lebendigen Organismus und den damit einhergehenden Besonderheiten des menschlichen Körpers überhaupt als dem Menschen äquivalent betrachtet werden können, wird oft lediglich mit dem Hinweis auf die gleiche Gattungszugehörigkeit von Mensch und Computer beantwortet: der Gattung "informationsverarbeitender Systeme" (49).

Als weitere positiv zu bewertende Faktoren einer computerunterstützten Theoriebildung werden von dieser Seite die Präzision und Klarheit von Computerformalismen hervorgehoben, die Eindeutigkeit der Begriffe voraussetzen. Einem Begriff muß eine klare definitorische Beschreibung zugewiesen werden, um die Bedingungen für entsprechende Modelle zu erfüllen. "Theories so developed are more likely to be precise and they provide bounds on the information processing required" (50). Hier wird deutlich, daß die Künstliche Intelligenz für viele Forscher eine neue wissenschaftliche Methode darstellt , mit der sich nicht nur Veränderungen der innerwissenschaftlichen Methodologie erzielen ließen, sondern die zudem neue Sichtweisen über den Menschen und damit über gesellschaftliche Strukturen ermöglichten. "Artificial Intelligence models provide a major new species of explanations of possibilities." (51). Die Annahme, mit intelligenten Computerprogrammen einen wesentlichen Beitrag zur Theoriebildung zu leisten, bezieht sich nicht nur auf die Modellbildung über kognitive Fähigkeiten von Menschen, sondern wird zudem als Perspektive für die Wissenschaft im Allgemeinen formuliert. Raulefs (52) hebt die Möglichkeit hervor, mit Hilfe von Expertensystemen vages Wissen und diffuse Sachgebiete durch die computerspezifischen Formaliserungsmethoden zu präzisieren. Er sieht in ihnen das "einzig effektive Werkzeug zur Beherrschung diffuser Gebiete", "da sie eine mechanisch manipulierbare Systematisierung" seien und so als "Theorien diffuser Gebiete" (53) dienen könnten. Wenn diese Ansicht in der hier vertretenen Ausschließlichkeit sicherlich auch problematisch ist, so soll doch die potentielle Bedeutung von KI-Systemen als eine Erweiterung der wissenschaftlichen Methoden nicht verleugnet werden. Die Auffassung Sloman's (54), der die Künstliche-Intelligenz- Forschung als "a new medium of self expression" (55) beschreibt und ihr den gleichen Stellenwert für die kognitive Entwicklung der Menschheit einräumt wie der Entdeckung des Schreibens, mag zwar überhöht erscheinen, doch implizieren Computer im Allgemeinen und KI-Systeme im Besonderen eine weitgehende Wandlung der bisherigen wissenschaftlichen Methoden. So kann beispielsweise die Inadäquatheit mathematischer oder physikalischer Methoden zur Beschreibung sozialer oder individualpsychologischer Strukturen sicherlich durch die Anwendung nicht unmittelbar numerischer hoher Programmiersprachen gemindert werden, wenn auch nicht übersehen werden sollte, daß Formalstrukturen - und um solche handelt es sich auch hier - nicht als ausreichend betrachtet werden dürfen für die theoretische Erfassung dieser Phänomene.

Hervorgehoben von Befürwortern der Theoriebildung mit Hilfe von Computersystemen wird immer wieder die potentielle Aufhebung der Kluft zwischen Theorie und Praxis; theoretische Ansätze erweisen sich dieser Auffassung entsprechend unmittelbar als falsch oder richtig, wenn ihre Anwendbarkeit in den entsprechend konzipierten Computerprogrammen getestet wird. Wenn auch formale wissenschaftstheoretische Kriterien wie Widerspruchsfreiheit und Präzision auf diese Weise überprüft werden können, so darf doch nicht übersehen werden, daß Probleme der Validität und Wirklichkeitsnähe von Theorien kaum durch Computerprogramme gefaßt werden können. Die damit potentiell einhergehende Reduktion von Theoriekonzepten um den Preis praktischer Effizienz und formallogischer Gültigkeitskriterien darf hier nicht übersehen werden, wird aber später noch näher problematisiert werden. Festgehalten werden kann demnach, daß im Zuge der Künstlichen Intelligenz neue wissenschaftliche Methoden zugänglich sind, die jedoch nicht als alleingültige "Rekonstruierungsmöglichkeiten wissenschaftlicher Erkenntnis" (57) begriffen werden sollten.

1.2.4 Paradigmen der KI-Forschung

Wie oben bereits ausgeführt bereitet die Determination von verbindlichen Prinzipien der KI-Fo schung aufgrund der Uneinheitlichkeit der theoretischen Ansätze Schwierigkeiten. Dennoch lass sich einige grundlegende Richtlinien identifizieren, die innerhalb der Künstlichen Intellige sogar mit dem Etikett "Paradigma" (58) versehen werden.

In den Anfängen der KI-Forschung war man von der Idee überzeugt, daß sich, ähnlich wie anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen, einige grundlegende Gesetzmäßigkeiten finde würden, welche die menschliche Intelligenz charakterisierten und die somit eine allgemeinver bindliche Grundlage bei der Konzeption intelligenter Computersysteme darstellen sollten. " artificial intelligence were to become a science, it ought to have discoverable grand an universal laws, like physics and chemistry" (59). Entsprechend dieser Annahme schien es gleich gültig zu sein, welchen Bereich intelligenten Verhaltens man als Basis für die Erforschun wählte, da die fundamentalen Gesetze in beliebigen Gebieten gültig sein müßten. Man begann mi der Konzeption von Spielprogrammen, überzeugt davon, "that certain great, underlying principle characterized all intelligent behavior and could be isolated in chess as easiliy as any plac else, and then applied to other endeavors that required intelligence" (60). Bald schon ließe sich folgende Prinzipien determinieren, nach denen die neuen Programme konzipiert waren Suchprozeduren, Generierungs- und Testabläufe und rückwärts gerichtete, vom anvisierten Zie ausgehende Schlußfolgerungen. Einen herausragenden Stellenwert nahmen die heuristischen Suchpro zeduren ein, die als vorherrschende Richtlinie (61) dieser ersten Phase der KI-Forschung gelte können.

Die rasch erreichten Grenzen derartig konzipierter Programme zeigten, daß die Annahme, mensch liche Intelligenz ließe sich auf einige fundamentale Gesetzmäßigkeiten zurückführen, offensicht lich falsch war. Feigenbaum (62) vertrat als einer der ersten die Ansicht, daß entgegen de Auffassung, generelle Prinzipien charkterisierten die Intelligenz, die Details, d.h. di einzelnen Fakten eines Problembereichs von entscheidender Bedeutung sind. So schien es notwen dig, das bisherige, "power-oriented paradigm" (63) Paradigma zu verlassen und stattdessen de Implementation von Wissen bei der Konzeption intelligenter Programme einen wesentlichen Stellen wert einzuräumen. "It was a shift from a search for broad, general laws of thinking toward a appreciation of specific knowledge - facts, expirienced knowledge and how to use knowledge - a the central issue in intelligent behavior" (64). Ohne Wissen über das jeweilige Gebiet se intelligentes Verhalten nicht möglich; Wissen bestimme die Art des Vorgehens bei der Lösun eines Problems. So gilt heute als allgemein anerkanntes Prinzip von allen Forschungszweigen de KI die Verankung von Wissen, ohne die eine Entwicklung intelligenter Programme nicht meh denkbar ist. "The current design paradigm for"intelligent" systems stresses the need for th availability of expert knowledge in the system along with associated knowledge handling faci lities" (65). Dabei wurde dieser "Paradigmenwechsel" nicht aufgrund neuer theoretischer Erkennt nisse vollzogen, vielmehr bildete der Erfolg von wissenden Systemen in der Praxis (insbesonder die mehrjährig erfolgreiche Erprobung des wissensbasierten Systems DENDRAL) die Grundlage diese innerwissenschaftlichen Wandels. Auch hier offenbart sich demnach wiederum das Vorherrsche pragmatischer Sichtweisen in der KI-Forschung, bei der immer dann neue Prinzipien verfolg werden, wenn sich diese als verwertbar erwiesen haben und erst in der Folge theoretisch Begründungen für vollzogene Änderungen erfolgen.

In den letzten Jahren deutet sich ein neuer Grundsatz innerhalb der KI- Forschung an: di Konzeption von lernenden Programmen. Da mit den Strategien von Suchprozessen und wissensba sierten Systemen immer noch keine wirklich intelligenten Programme geschaffen werden konnten erhofft man sich, durch die Implementation von Lernfähigkeit.

1.2.5 Methoden der KI-Forschung

Viele der unterschiedlichen Methoden, die im Rahmen der Künstlichen Intelligenz entwickelt wurden, lassen sich auf ein grundlegendes Prinzip zurückführen: die Einschränkung von Suchpro zessen und Lösungsmöglichkeiten. Dieses Vorgehen basiert auf der weit verbreiteten Annahme, daß Problemlösungen mit Suchvorgängen gleichzusetzen sind, es somit bei der Konzeption effiziente Programme vornehmlich darum gehe, die Fülle an Möglichkeiten durch verschiedene Strategien z begrenzen. Im Folgenden werden einige der wesentlichen Methoden der KI-Programmierung in Kürze dargestellt.

Die anfänglichen Methoden in der KI-Forschung lassen sich wohl am ehesten mit dem Bezeichnung "blind or brute-force search" (66) charakterisieren. Nach dem "Trial and Error"-Prinzip wurde in den Programmen nach Lösungen gesucht, wobei einzig die Schnelligkeit der Rechner zur Effizienz der Programme führte. Naheliegenderweise erwies sich dieses Vorgehen bei komplexeren Programmen als völlig ineffektiv, da der Zeitaufwand zur Bewältigung einer schwierigen Aufgabe unangemessen hoch wird. Zudem kann dieses Vorgehen eigentlich nicht zu den KI-Prinzipien gezählt werden; lediglich die Zielsetzung, intelligente Programme zu schaffen, läßt eine Darstellung der Methode in diesem Kontext zu.

Als Folge dieser Ineffektivität entstanden die ersten heuristischen Suchprozeduren, d.h. Verfahren, bei denen die Suchprozesse durch problembezogene Regeln eingeschränkt und durch Kontrollstrukturen organisiert werden. Diese regelbasierten Suchprozeduren gehören auch heute noch zu den grundlegenden Methoden der KI-Forschung. Die heuristische Suche basiert dabei auf Mustererkennungsprozessen, "pattern recognition" (67), da ein aktuelles Problem oder eine programmspezifische Situation mit den programminternen Regeln verglichen werden muß, um die Auswahl dieser Regeln im heuristischen Suchprozeß problemadäquat vornehmen zu können.

Wie oben bereits erwähnt, werden Problemlösungen in der KI-Forschung° häufig als Suchvorgänge begriffen, als sogenannte "state space ° search" (68). So werden für ein Problem jeweils der Ausgangspunkt, das erwartete Ziel und die jeweiligen Zwischenstadien, die während eines Suchprozesses durchlaufen werden können, festgelegt, wobei diese Problemstadien als Basis für die Mustererkennung und damit auch für die Steuerung des Suchprozesses fungieren. "The state space representations forms the basis of virtually all of the AI-methods" (69). Die Allgemeingültigkeit dieses Vorgehens wird mit den beiden folgenden Argumenten begründet:

1.eine formale Deskription des Problems durch die Darstellung des Ausgangs- und des Zielzustandes sowie die Implementation derjenigen Operatoren (Regeln), mit denen die gewünschte Lösung erzielt wird, ließe sich für alle Problemgebiete vornehmen;

2. die Gleichsetzung einer Problemlösung als der Anwendung von problemspezifischen Regeln, die den Suchprozeß vom Ausgangs- bis zum Zielzustand leiten, könne als erwiesen betrachtet werden.

Auf das hier offenbar werdende Problemkonzept innerhalb der KI-Forschung wird in späteren Kapitel nochmals ausführlich eingegangen werden; hier soll lediglich festgehalten werden, daß die Implementation heuristischer Suchprozesse in Problemlösungsprogrammen als grundlegende Methode der Künstlichen Intelligenz gilt.
Eine weitere wichtige methodische Vorgehensweise in der KI-Forschung ist die Implementation von Planungsprozessen. Für ein spezifisches Problem wird vom Programm ein Lösungsplan erstellt, dessen hauptsächliche Funktion die Einengnung des Suchraums ist, um auf diese Weise den Suchvorgang von vorneherein zu begrenzen. Um die geplanten Lösungswege nicht in Sackgassen enden zu lassen, müssen die Planungeprozesse derart offengehalten werden, daß eine Rückkehr zum Suchbeginn immer dann möglich ist, wenn sich der eingeschlagene Weg als falsch erweist. Planungsvorgänge implizieren häufig die Einschätzung von vorhandenen Lösungswegen unter dem Gesichtspunkt der Schnelligkeit und des zu erzielenden Resultats. Sie sind damit, ähnlich wie die heuristischen Suchprozeduren, eng gebunden an die programmspezifische Wissensbasis, in der entsprechende Informationen verankert sind.

Die Verankerung von Wissen, " the representation of knowledge" (71) stellt die Grundlage dar für die unterschiedlichen Methoden zur Eingrenzung des Suchraums. Wissen bildet somit die Basis sowohl für die heuristischen Suchalgorithmen als auch für die problemadäquaten Planungsprozeduren. Erst die im Datenspeicher verankerten Fakten ermöglichen über Matching-Prozeduren (Mustererkennungen) die Auswahl der Regeln, mit denen sowohl die Einschränkung des Suchraums als auch die Lösung eines Problems realisiert werden kann. Die verschiedenen Repräsentationsstrukturen zur Verankerung von Wissen, die zum Teil bereits Kontroll- und Steuerungsmechanismen beinhalten, werden im folgenden Kapitel detailliert dargestellt.

Wachsende Bedeutung gewinnen die logischen Ableitungsverfahren. Durch die Entwicklung der Programmiersprache PROLOG (einer Programmiersprache, die auf der Prädikatenlogik basiert), aber auch durch die erfolgreiche Konzeption von Theorem-Beweiser-Systemen nahm man innerhalb der KI-Forschung sogar zeitweise an, daß sich mit Hilfe deduktiver Methoden, insbesondere durch die Resolutions-Methode, alle in der KI auftretenden Probleme lösen ließen. Obwohl sich diese Annahme als falsch erwies, spielen die logischen Ableitungsverfahren immer noch eine wichtige Rolle; insbesondere die Weiterentwicklungen des Bereichs "non-monotonic logic" (72), (73) , die

eine Integration von vagem und unvollständigem Wissen ermöglichen sollen, sind von zukunftsweisender Bedeutung für die Künstliche Intelligenz.

Eine sehr zukunftsträchtige Programmiergrundlage stellt die Implementation sogenannter Meta-Heuristiken dar. Metaregeln dienen als Kontrollstrukturen und implizieren eine wissensbasierte und problemspezifische Steuerung von Problemlösungsprozessen. Angestrebt wird, daß Programme derartige Metaregeln selbst bilden können (siehe das System EURISCO (74)), d.h. eine selbstgesteuerte Modifikation der intern verankerten Strategien immer dann vornehmen, wenn sich andere Wege als besser erwiesen haben. Diese, oftmals mit dem Begriff "Lernen" gleichgesetzte Fähigkeit wird in naher Zukunft eine wesentliche methodische Bedeutung gewinnen.

Die hier nur begrenzt aufgeführten Methoden der KI-Forschung werden zum Teil in späteren Kapiteln noch in aller Ausführlichkeit dargestellt werden, wobei ein besonderer Schwerpunkt jenen Methoden gelten wird, die in den gegenwärtig am weitesten verfügbaren KI-Systemen, den Expertensystemen, vorrangig Anwendung finden.

1.2.6 Das Problemverständnis in der KI-Forschung

Im Allgemeinen erweist sich die Übersetzung einer informellen Problembeschreibung in formalisierte Strukturen als schwierig. Die Determination der Lösung durch die Beschreibung der unterschiedlichen Problemstadien und die Festlegung der Regeln bzw. Operatoren, die zum gewünschten Ziel führen, läßt sich als Balanceakt zwischen der angestrebten Generalität des Lösungsweges und einer drohenden Ineffizienz der Regelanwendung beschreiben. "At one extreme, we write so many rules, that any problem could be solved, albeit slowly. At the other extreme, we take a particular problem, analyze it to the point that its solution is completely determined, and write a set of rules directly specifying a complete solution" (75). Dabei gilt: je generellere eine Problembeschreibung- und lösung ist, desto eher erfüllt das Programm das Kriterium von intelligenten Problemlösungen.

Das Problemverständnis in der KI-Forschung ist in vielerlei Hinsicht kritisch zu bewerten. So wirft Weizenbaum (76) den KI-Forschern nicht zu Unrecht vor, sie verwandelten jedes Problem in eine technische Aufgabe. Die Mittel-Ziel-Analyse, die als Grundlage jeder Programmerstellung gilt, reduziert Problemstellungen auf die Festlegung von Ausgangs- und Zielzuständen sowie formalisierbaren Zwischenstadien, eine Methode, die zwar für manche Aufgaben gerechtfertigt sein mag, sich für viele Gebiete jedoch als gänzlich unzulänglich erweisen muß. Die Reduktion komplexer Probleme durch die rigide Aufspaltung von Fragestellungen in festgelegte Stadien und die Determination von Regeln, deren Anwendung den Problemlösungsweg determiniert, ist vor allem dann bedenklich, wenn diese Methoden als adäquat für alle denkbaren Aufgabengebiete angesehen werden. "Der springende Punkt ist der, daß die Durchdringung - man könnte sogar Perversion sagen - des Alltagsbewußtseins durch die Computer-metapher aus jedem Problem ein technisches gemacht hat, von dem man annimmt, man könne darauf die hier besprochenen Methoden anwenden" (77).

Die einem solchen Vorgehen zugrunde liegende wissenschaftstheoretische Auffassung, die Problemlösungen gleichsetzt mit formalen Operationen, wird in spätern Kapiteln noch diskutiert werden.

1.2.7 Wissenschaftstheoretische Implikationen der KI-Forschung

Obwohl manche Ansätze der KI-Forschung problematisch und vor allem die Euphorie derjenigen KI-Forscher bedenklich erscheinen, die alles mit Computern simulieren zu können glauben (Als Beispiel diene hier ein Zitat von McCarthy (Stanford University):"Der einzige Grund dafür, daß es uns bisher nicht gelungen ist, jeden Aspekt der realen Welt zu simulieren, ist der, daß wir noch nicht über ein genügend leistungsfähiges Rechnerprogramm verfügen" (78)), wird die Künstliche Intelligenz einen wichtigen Einfluß auf die Theoriebildung in vielen Wissenschaftszweigen nehmen. Die im Rahmen der KI-Forschung stattfindende Entwicklung neuer Konzepte und Methoden können für die Strukturierung und Klassifizierung von Informationen nützlich sein und zu neuen Möglichkeiten der Interpretation von beobachtbaren Phänomenen der realen Welt führen. Die Formalisierungsstrukturen der Künstlichen Intelligenz implizieren die Chance, bestehende Theorien unter einem neuen Blickwinkel zu überprüfen und weiterzuentwickeln und in Teilaspekten durchaus vorteilhafte Strukturierungen von Wissensgebieten vorzunehmen. Die damit verbundenen Möglichkeiten, Erklärungen für bislang unverstandene Phänomene zu finden, könnten einen innovativen Anreiz für die Wissenschaft darstellen, d.h., die Methoden, mit denen bislang Erkenntnisse über die Wirklichkeit gewonnen wurden, erfahren durch die KI-Forschung eine herausfordernde Ergänzung. Das menschliche Denken kann durch die Konfrontation mit intelligenten

Computerprogrammen eine Erweiterung seiner Fähigkeiten im logisch-formalen Bereich sowie in der Strukturierung und Präzisierung von Wissen erfahren, was insbesondere dann positiv zu beurteilen wäre, wenn antizipatorisches und intuitives Denken mit operationalem Denken gepaart würden. Die damit zu erzielende Vertiefung, Klärung und Erweiterung bereits durchdachter Probleme impliziert die Chance eines Erkenntnisgewinns. So sind beispielsweise neue Impulse für die traditionelle philosophische Frage der Referenz zwischen Begriffen und Wirklichkeit denkbar, wie sie sich als Folge der Reflexion über die Repräsentation von Wissen in Computern notwendigerweise ergeben.

Die Erweiterung der "language of Science" (79) durch die symbolische Repräsentation von Wissen in Computersystemen bedingt damit, insbesondere, wenn die neuen Möglichkeiten mit Skepsis und Verantwortungsbewußtsein angewandt werden, eine wesentliche Erweiterung der bisherigen Methoden wissenschaftlicher Erkenntnis. Doch besteht eine große Gefahr, daß KI-Systeme nicht nur als Elemente begriffen werden, mit denen sich die alten methodischen Ansätze ergänzen lassen, sondern daß Erkenntnissuche beschränkt wird auf die Art, wie beispielsweise Newell und Simon innerhalb der Kognitionspsychologie operieren: Theoriebildung und -überprüfung vorzunehmen, indem entsprechend konzipierte Computerprogramme als Indikatoren begriffen werden für Verifikation oder Falsifikation eines theoretischen Modells und dieses Vorgehen als hinreichende Methodik zur Theoriebildung gilt.

Der verantwortungsbewußte, d.h. limitierte Einsatz von intelligenten Computersystemen, der eine Voraussetzung für die positive Nutzung der Künstlichen Intelligenz in der Theorieentwicklung ware, erscheint somit fraglich. Die Probleme, die sich daraus ergeben, werden später noch erläutert werden; hier soll abschließend mit Sloman (80) und Negrotti (81) auf die Bedeutung der Künstlichen Intelligenz für zukünftige philosophische und wissenschaftstheoretische Konzepte hingewiesen werden, die sich unmittelbar aus der methodologischen Anwendung von Computern in der Wissenschaft ergibt.

2.1 Allgemeine Grundlagen zur Wissensrepräsentation

2.1.1 Einleitende Bemerkungen

Wie bereits erwähnt, wurden in der Anfangsphase der Künstlichen-Intelligenz-Forschung die Forschungszweige"Planning and Searching" als entscheidende Grundlage für die Entwicklung intelligenter Computersysteme angesehen. Durch effiziente, d.h.heuristisch konzipierte Suchstrategien glaubte man die Basis schaffen zu können, Computer zu intelligenten Problemlösungen zu befähigen und damit die bisherige Leistungsfähigkeit von Computerprogrammen erheblich zu steigern (2). Im Zuge der Entwicklung der KI-Forschung jedoch erkannte man schnell die Grenzen dieser Vorgehensweise; so teilte eine zunehmende Anzahl von KI-Forschern bald die Auffassung, daß zur Realisierung maschineller Intelligenz die Implementation von Wissen in Computerprogrammen eine unabdingbar notwendige Vorraussetzung sei. Immer häufiger wurde intelligentes Verhalten mit "wissendem" Verhalten gleichgesetzt und dafür plädiert, Strukturen zu entwickeln, mit denen die Speicherung und der Umgang mit Wissen in Computern verwirklicht werden konnte. Kontinuierlich wurde so das "power-oriented" Paradigma (3) der heuristischen Suchprozesse abgelöst durch ein neues vorherrschendes Prinzip, daß die KI-Forschung heute entscheidend prägt: die Repräsentation von Wissen und der damit gekoppelte neue KI- Forschungszweig "knowledge representation", der heute als einer der fundamentalen Gebiete der KI-Forschung gilt.

Die Konstruktion wissensbasierter Systeme setzt die Entwicklung von effizienten Repräsentationsschemata ("representation schemes" (4)) voraus. Diese Strukturen müssen nicht nur so konzipiert sein, daß sie die Fakten und Zusammenhänge eines Gebietes adäquat darstellen können, sondern sollen darüberhinaus bereits mit Strategien assoziiert werden, die zur jeweiligen Problemlösung notwendig sind. "Experience has shown that designing a good representation is often the key to turning hard problems into simple ones" (5).

Die Divergenz der unterschiedlichen Konzepte zur Wissensrepräsentation, vor allem aber die per se sehr komplexe und schwierige Problemstellung führten zu einer Verschwommenheit der theoretischen Ansätze. Die damit einhergehende Unklarheit in der Terminologie, die sogar die grundlegenden Begriffe "Wissen" und "Repräsentation" einschließt, sowie eine oftmals sehr fachgebundene Entwicklung von Repräsentationsschemata, die keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben können, all dies pointiert hier noch die für die KI-Forschung insgesamt typische Diffusität der theoretischen Grundlagen. Versucht man dennoch eine Charakterisierung dessen, was sich innerhalb der Künstlichen Intelligenz hinter dem oftmals benutzten Begriff "Wissen" verbirgt, so kann folgende Definition Wahlsters als typisch gelten: Wissen wird hier gleichgesetzt mit einer "Ansammlung von Kenntnissen, Erfahrungen und Problemlösungsmethoden ..., die den Hintergrund für komplexe Informationsverarbeitung bilden. Das Wissen besteht aus Daten über Objekte, Relationen und Prozesse"(7).

Eine verhältnismäßig große Einigkeit unter den KI-Forschern besteht allerdings in der Annahme, daß Wissen grundsätzlich in Computern repräsentiert werden kann, wobei jedoch die Differenzierung zwischen analogem, symbolischem oder analog-symbolischem Wissen kaum je vorgenommen bzw. reflektiert wird. So läßt sich lediglich feststellen, daß die Künstliche Intelligenz "is mostly concerned with symbolic formal representations" (8), d.h. die formal-konzeptülle Repräsentation von Wissen notwendigerweise im Vordergrund steht. Bei der Konzeption einer Wissensbasis sind unterschiedliche Ebenen zu berücksichtigen, die Schefe(9) in einem terminologischen Netzwerk aufzeigt:

Physikalische Realisation.....Materialisierung
konkrete Datenstrukturen.....Implementation
abstrakte Datenstrukturen.....Implementation
Formale Symbole.....Formalisierung
Wörter.....Bezeichnung
Begriffe.....Bezeichnung
die Dinge an sich.....Referenz

Im Rahmen der Arbeit soll in erster Linie auf die Bereiche eingegangen werden, die in der oben aufgeführten Terminologie mit den Begriffen Formalisierung, Bezeichnung und Referenz gekennzeichnet sind; die Implementationsebene wird lediglich kurz und nur bezogen auf die abstrakten Datenstrukturen (d.h. im Hinblick auf die Programmiersprachen) berücksichtigt. Zunächst jedoch sollen allgemeine Aspekte der Darstellung von Wissen in Computern erläutert werden.

2.1.2 Probleme der Transformation von Wissen

Die Repräsentation von Wissen in Computern wirft zwei grundlegende Fragen auf:

1. die Feststellung der relevanten Fakten eines Wissensgebietes
2. die formale Repräsentation dieser Fakten in einer Computerwissensbasis.

Diese Fragestellungen implizieren nicht nur Überlegungen, welche Form und welcher Umfang an Wissen eines bestimmten Fachgebiets notwendigerweise in einer Datenbasis verankert werden müssen, sondern auch die Reflexion, ob überhaupt alles Wissen erfaßbar ist und sprachlich ausgedrückt werden kann. Daran anknüpfend stellt sich überdies das Problem der Transformation umgangssprachlich ausgedrückten Wissens in die Formalstrukturen der Wissensrepräsentation, wobei gewährleistet sein sollte, daß durch die formale Übersetzung keine Informationen verloren gehen. Aufgrund der noch begrenzten Speicherkapazitäten von Computern stellt sich die Notwendigkeit, eine spezifische Auswahl der als relevant eingeschätzten Fakten und Zusammenhänge vorzunehmen. Diese Selektion birgt jedoch die Gefahr in sich, daß unwesentlich scheinende, real aber wichtige Tatsachen unberücksichtigt bleiben, und es so zu einem verfälschten oder reduzierten Abbild des jeweiligen Realitätsausschnitts kommt.

2.1.3 Allgemeine Fragen der Wissensrepräsentation

An diese generellen Fragen schließen sich weitere epistemologische Probleme an, die sich global gesehen in folgenden Fragen offenbaren:

- existieren jeweils eindeutige Formen zur Repräsentation einer Tatsache, eines Ereignisses oder einer Idee?
- lassen sich Ideen und Überzeugungen überhaupt repräsentieren?
- wie bewältigt man das Problem unvollständiger Wissensbasen?
- ermöglicht die Transformation oft natürlichsprachlich gefaßter Tatsachen und Objektbeschreibungen in die Computerformalsprache eine adäquate Wirklichkeitsbeschreibung?
- existiert eine einheitliche Form der Repräsentation von Objekten trotz differenter Objektbeschreibungen?
- wie lassen sich Raum- und Zeitvorstellungen sowie Wahrscheinlichkeiten formalisieren?
- welche Beziehung existiert zwischen den Schemata einer Wissensbasis und den Dingen der realen Welt (Referenz der Begriffsbildung)?

Diese Fragen setzen eine genauere Überprüfung der Art und Weise voraus, wie Wissen in Computern gespeichert wird und welche Formen von Wissen innerhalb der KI-Forschung als relevant für ein Problemgebiet begriffen werden. Auf diese Aspekte wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels eingegangen werden.

Die Wissensbasis eines Computersystems stellt jeweils ein Modell eines engbegrenzten Ausschnitts der Realität dar; "a knowledge base will be treated as a model of a world / enterprise / slice of reality" (10). Damit wird Wissen über ein Problemgebiet in einer Datenbasis in aller Regel als eine Ansammlung von Fakten und Zusammenhängen begriffen; "as a collection of individuals and relationsships between them" (11). Die jeweiligen Objekte oder Fakten und ihre Verknüpfungen und Beziehungen stellen immer einen Status zu einem bestimmten Zeitpunkt dar, der als prinzipiell modifizierbar und manipulierbar betrachtet wird. Die Verankerung von Objekten und Relationen wird erweitert durch Prozeduren, die sowohl den Umgang mit den Fakten als auch Situations- und Aktionsabläufe repräsentieren; hierzu Barr / Feigenbaum (12): "In AI, a representation of knowledge is a combination of data structures and interpretive procedures that, if used in the right way in a program, will lead to "knowledgeable" behavior". Hier wird deutlich, daß in der AI-Forschung Wissen nicht als bloße enzyklopädische Faktenkollektion begriffen wird, sondern daß neben der reinen Repräsentation von Objekteigenschaften die Darstellung von Zusammenhängen und auch die Implementation von Heuristiken über den Umgang mit Wissen einen ebenso hohen Stellenwert in den Wissensbasen einnehmen. Die Datenbasen von KI-Systemen umfassen somit überlicherweise deklaratives wie auch prozedurales Wissen; die Methoden zur Organisation von und dem Umgang mit Wissen sind somit in viele Wissensbasen der Künstlichen Intelligenz integriert.

2.1.4 Bedingungen für die Repräsentation von Wissen

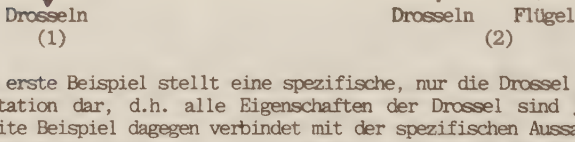
Die vielfältigen Probleme, die sich bei der Konstruktion einer Wissensbasis ergeben, führten zu

der Erkenntnis, daß es notwendig sei, Bedingungen zu formulieren, denen effiziente Wissen systeme genügen sollten. Die entsprechenden Forderungen bezogen sich sowohl auf die Art d Wissens, das in Datenbasen verankert werden muß als auch auf allgemeine Kriterien für d Darstellung von Wissen, die in den KI-Programmen realisiert werden sollten. Barr u Feigenbaum(13) zählen zu den KI-Forschern, die sich um eine Determination der Wissensinhal bemühten, die notwendigerweise repräsentiert werden müssen, um intelligente Problemlösung durch Computer zu ermöglichen; zu diesen zählen:

1. Beschreibung von Objekten, Objektklassen und ihren Beziehungen;
2. Darstellung von Ereignissen gemäß ihrer zeitlichen Folge und ihrem Kausal-Verhältnis von Ursache und Wirkung ("cause- and effect relations" (14));
3. Repräsentation von Kenntnissen über die Durchführung einer Aktion, die Ausübung von Fertigkeiten ("performance" (15));
4. Metawissen: "knowledge about what we know"(16), d.h. Wissen über Umfang, Zuverlässigkeit, Relevanz und Ursprung der Wissensinhalte sowie Wissen über die eigenen Fähigkeiten und Grenzen.

Um die Fakten eines Gebietes unter dem Gesichtspunkt ihrer Relevanz für einen speziell Problemfall zu selektieren, bedarf es computerinterner Strategien. Im Gegensatz zum Mensche dem der direkte situationsadäquate Zugriff auf sein Wissen kaum Schwierigkeiten bereitet, stel sich dies in Computern als relativ schwer zu lösendes Problem dar. Daher gehört zu den weiter Bedingungen für die Konzeption einer Wissensbasis die Entwicklung und Implementation leistung fähiger Such- und Kontrollstrategien, die der Auswahl von problemadäquaten Fakten in ein Wissensbasis dienen. Allgemein anwendbare Möglichkeiten wurden hier realisiert durch d Zusammenfassung von Fakten unter generelle Strukturen sowie durch die Verkettung und Verklumpu von problemspezifischen Tatsachen: "linking and lumping"(17).

Neben diesen prinzipiellen Kriterien für die Datenspeicherung in Wissensbasen sind weite theoretische Aspekte zu nennen, die bei der Konstruktion von Wissenssystemen zu berücksichtig sind. So erscheint es wichtig, daß die Auswahl der Schemata in einer Wissensbasis unter Berüc sichtigung des jeweiligen Wirklichkeitsausschnittes stattfindet, d.h. diejenigen Repräsent tionsstrukturen bevorzugt werden, die am ehesten geeignet scheinen, den jeweiligen Realitätsau schnitt adäquat abzubilden. Darüberhinaus kann bereits bei der Speicherung der Daten in Form d verschiedenen Repräsentationsschemata über die Spezifizität bzw. Generalität der Darstellu entschieden werden, da die Strukturen zur Wissensrepräsentation bereits das Spektrum möglich Schlußfolgerungen in sich bergen. Als Beispiel läßt sich die primitve Beschreibung des Voge "Drossel" in zwei unterschiedlichen Formen darstellen:



Das erste Beispiel stellt eine spezifische, nur die Drossel als Objekt betreffende Faktenrepr sentation dar, d.h. alle Eigenschaften der Drossel sind jeweils nur auf diese bezogen. D zweite Beispiel dagegen verbindet mit der spezifischen Aussage über die Drossel eine allgemei Eigenschaftszuweisung, die eine generelle Zuordnung der Eigenschaften von Vögeln möglich mac und damit ein breiteres Sprektrum an Schlußfolgerungen zuläßt.

Prinzipiell dienen Objektklassen der Reduktion des Umfangs einer Wissenbasis durch eine mö lichst generelle Beschreibung der Objekte. Nach der Verankerung von typischen Merkmalen ein Objektklasse, die für die meisten Mitglieder einer Kategorie gelten, müssen dann lediglich d abweichenden Attribute spezifischer Objektausprägungen ergänzt werden.

2.1.5 Kriterien für die Implementation von Wissen

Neben diesen Bedingungen, denen Wissensbasen von KI-Systemen genügen sollten, wurden Kriteri entwickelt, die eine differenzierende Einschätzung der unterschiedlichen Repräsentationsstru turen ermöglichen sollen. Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung und Differenzierung v Wissensrepräsentationsstrukturen wird mit dem Begriff Modularität ("modularity (18)) bezeichne Existierende Datenstrukturen können durch neue Fakten ergänzt werden, um so die Wissensbasen

aktualisieren. Die Modularität einer Repräsentationsstruktur schafft dabei die Möglichkeit, neues Wissen in eine bestehende Datenbasis zu integrieren, ohne daß Wechselwirkungen mit anderen Daten und damit einhergehend eine mögliche Inkonsistenz befürchtet werden muß(20). Die Unabhängigkeit der Datenstrukturen wird in der KI-Forschung als wesentliches Gütekriterium begriffen, wobei an diesem Punkt deutlich wird, daß praktischen Fragen der Implementation bei der Beurteilung von Repräsentationen eine oftmals entscheidende Bedeutung beigemessen wird. Kennzeichnend ist in diesem Zusammenhang, daß Widerstände gegen die Verankerung kontextgebundenen Wissens hauptsächlich mit dem Argument mangelnder Modularisierung - also programmtechnischer Schwierigkeiten - begründet werden. "Context dependency... dramatically affects the modifiability of the knowledge base; modification is much easier if the meaning of a fact can be specified when the fact is entered or removed, independent of the rest of the system" (21). Die dieser Auffassung zugrundeliegende Annahme, Wissen ließe sich in unabhängige Elemente gliedern, scheint für weite Bereiche der Künstlichen Intelligenz typisch zu sein; charakteristisch ist in diesem Zusammenhang der immer wieder verwandte Begriff "pieces of knowledge". Verkannt wird mit dieser atomistischen Sichtweise, daß Wissen nicht ohne den je spezifischen Bedeutungsgehalt zu denken ist, daß sich aber die Bedeutung von Objekten oder Szenarios zumeist nur innerhalb eines spezifischen Kontextes erfassen läßt, d.h. aber auch, daß die oft erhobene Forderung nach der Modularität von Wissensstrukturen dem Versuch der Wirklichkeitsabbildung entgegensteht. Bei der Auflistung weiterer Kriterien für die Beurteilung von Repräsentationsstrukturen wird Bezug genommen auf Konzepte der Wissenschaftstheorie. Die lange vorherrschende Präferenz formallogischer Strukturen zur Repräsentation von Wissen (Aussagen- und Prädikatenlogik) bewirkte, daß Vollständigkeit ("completeness") und Konsistenz ("consistency" (22)) als relevante Voraussetzungen von Computerwissensbasen bezeichnet wurden.

Unter Konsistenz wird dabei die Gewißheit verstanden, daß alle Ableitungen eines Aussagesystems (hier der Wissensbasis) korrekt und widerspruchsfrei sind, während eine dem Kriterium der Vollständigkeit genügende Wissensbasis gewährleisten muß, daß sich jede Aussage und deren Negation begründen läßt (23).

Die meisten der real existierenden Wissensbasen genügen diesen formalen Kriterien nicht, doch wird zu Recht darauf hingewiesen, daß große Bereiche menschlichen Wissens - und auf dessen maschinelle Transformation zielt ja die KI-Forschung - nicht den strengen formalen Kriterien der klassischen Logik entsprechen. McDermott/Doyle und Hewitt (24) beispielsweise vertreten die Auffassung, daß die für Menschen typische Form des Umgangs mit Wissen oft darauf basiert, Annahmen und Überzeugungen als Grundlage von Entscheidungen zu nehmen und diese im Fall der Entdeckung eines Widerspruchs zurückzuweisen oder zu modifizieren. b"Most of our knowledge is not absolute; we regularly accept caveats and exceptions" (25). Das Problem, mit unvollständigem Wissen und möglichen Widersprüchen umzugehen, die sich bei der Hinzufügung neuer Fakten ergeben können, stellt sich bei der Konstruktion von Wissensbasen routinemäßig. Eine hinlängliche Gewähr für Widerspruchsfreiheit kann nur durch eine ständige Überprüfung der Wissensbasis bei der Implementation neuer Daten gegeben werden, indem dabei auftretende Inkonsistenzen durch Zurückweisung und Neuformulierung eleminiert werden. Vollständige Wissenbasen im Sinne des Vollständigkeitssatzes sind ohnehin kaum zu konzipieren, da die Form von Wissen, die in KI-Systemen implementiert wird, sich der vollständigen Formalisierung insofern bereits entzieht, als selbst das Wissen über ein engbegrenztes Problemgebiet nicht als geschlossenes System betrachtet werden kann. Zudem setzen viele KI-Forscher diesem° Anspruch an Vollständigkeit die Erkenntnis Gödels entgegen, nach der ohnehin für jedes Aussagensystem mindestens ein Satz existiert, der nicht ableitbar ist (26).

Ergänzend zu den oben genannten Bedingungen nennt Rich (27) weitere Eigenschaften, die Wissensbasen beinhalten sollten:
- "Representational Adequacy"; die Fähigkeit, das Wissen eines Gebietes in allen Variationsbreiten darstellen zu können;
- "Inferential Adequacy"; die Fähigkeit, aus altem Wissen neues Wissen durch Schlußfolgerungen abzuleiten und neue Wissensstrukturen zu bilden;
- "Inferential Efficiency"; die Fähigkeit, in die Wissensbasis Kontrollwissen, d.h. Kenntnisse, wie die Bearbeitung der Strukturen dirigiert werden kann, zu integrieren;
- "Acquisitional Efficiency"; die Fähigkeit, neue Informationen zu speichern und in die Wissensbasis zu integrieren.

Gemessen an bereits implementierten Computerwissensbasen müssen die Kriterien als bislang kaum verwirklicht betrachtet werden. So ist es in KI-Systemen nur selten möglich, Wissen über ein

Gebiet gleichzeitig in mehreren unterschiedlichen Formalstrukturen zu repräsentieren; es existieren lediglich Ansätze, durch Software-Tools wie beispielsweise BABYLON (28) verschiedene Repräsentationsformen in einer Wissensbasis zuzulassen. Gewisse prinzipielle Grenzen der gegenwärtiger Wissensrepräsentation in Computern werden dadurch allerdings nicht erweitert, die sich beispielsweise darin äußern, daß aufgrund fehlender sensorischer Wahrnehmungsfähigkeit keine Vorstellungen als Repräsentationen implementierbar sind (Auf diesen wichtigen Aspekt wird in der Folge noch einzugehen sein).

Die Bildung neuer Wissensstrukturen ist benutzerunabhängig ebenfalls nur sehr begrenzt möglich. Systeme wie EURISCO (30) verfügen zwar über die Fähigkeit, neue Regeln zu bilden, wobei jedoch die abstrakte Struktur der Wissensrepräsentation durch die Regelform vorgegeben ist, man also nur sehr bedingt von einer Neubildung sprechen kann. Wenn auch teilweise versucht wurde, Kontrollstrukturen durch sogenannte Meta-Regeln in die Wissensbasis zu integrieren (NEOMYCIN) und bei der Hinzufügung neuer Fakten eine zumindest syntaktische Konsistenzüberprüfung vorzunehmen (THEIRESIAS, M1), so sind die von Rich (31) aufgeführten Kriterien eher zukunftsweisend als charakteristisch für bestehende Wissensbasen.

2.1.6 Grundsätzliche Unterschiede zwischen Repräsentationsstrukturen

Innerhalb der theoretischen Diskussion über die Repräsentation von Wissen in Computern versucht man - über die Formulierung von Bedingungen für Wissensbasen hinausgehend - prinzipielle Unterschiede der spezifischen Repräsentationsstrukturen hervorzuheben. Im Kontext dieser Bemühungen entbrannte die mittlerweile historische Auseinandersetzung um die Vorzüge von deklarativen Formen der Wissensdarstellung gegenüber den prozeduralen Repräsentationsstrukturen. Konkret entzündete sich der Streit an der Gegenüberstellung von Theorembeweisersystemen, die auf der Prädikatenlogik basieren und den prozeduralen Prototypen (z.B. Planner bzw. dem auf ihm basierenden Programm SHRDLU). Der wissenschaftsinterne Disput bezog aber darüberhinausgehend auch andere Formen einer deklarativen Wissensrepräsentation wie "semantic nets", "frames" und "scripts" sowie prozeduralorientierte Strukturen wie die "production-systems" in den Vergleich mit ein. So betonten die Befürworter deklarativer Wissensdarstellung die Flexibilität, Ökonomie, Sicherheit und Modularität ihrer Systeme, die insbesondere auf der aktions- und ablaufunabhängigen Art der Repräsentation basieren und damit besonders geeignet seien zur Darstellung statischer Phänomene (jedes Objekt, jede Tatsache oder jedes Ereignis wird in deklarativen Systemen unabhängig von der system- und problemspezifischen Bearbeitung implementiert), während die Anhänger prozeduraler Wissenssysteme die Verständlichkeit und die Bequemlichkeit der Codierung (auch für Laien) hervorhoben und vor allem auf die Unmittelbarkeit und damit verbundene Effizienz der Schlußfolgerungen durch die, für rozedurale Strukturen charakteristische, problemfeldbezogene Heuristik verweisen (32). Rich (33) bezeichnet als Vorteile deklarativer Systeme die diesen eigene Möglichkeit einer einfachen Repräsentation von Fakten, die anwendungsunabhängig gespeichert werden und damit sowohl leicht ergänzbar als auch modifizierbar sind. Als Vorzüge prozeduraler Systeme werden hier genannt: die direkte Repräsentation von Aktionsabläufen, d.h. von Handlungswissen, die unmittelbare Verknüpfung mit heuristischen Ablaufstrategien sowie die Integration von Wahrscheinlichkeitsdenken, von "probabilistic reasoning" (34). Trotz dieser auch heute noch gültigen Unterscheidung stimmen gegenwärtig die meisten AI-Forscher darin überein, daß effiziente Wissenssysteme sowohl deklarative als auch prozedurale Strukturen zur Wissensrepräsentation beinhalten müssen und dies auch der Anwendungspraxis entspricht: "most systems use a combination of the two methods" (35). Durch die Verknüpfung einer deklarativen Struktur mit einer prozeduralen, z. B. in Frames durch eine sogenannte "attached procedure" (36), kann eine durch Aufruf des Frames direkt verfügbare Strategie an die deklarative Struktur gebunden werden.

Die mittlerweile als typisch zu betrachtene Verwobenheit beider Formalismen trägt den theoretisch nicht rigide zu trennenden Kategorien der Wirklichkeit Rechnung; "it should be clear that there is no clear-cut boundary between declarative forms of representation and procedural ones. Instead, there is a spectrum, and the choice of the correct position along this spectrum for the representation of a particular knowledge base depends on the knowledge itself and on the use to which it is to be put" (37).
Eine weitere theoretische Differenzierung zwischen den Repräsentationsstrukturen wird durch die Aufgliederung in eher syntaktische und eher semantische Formalismen vorgenommen. In den letzten Jahren gewann die Darstellung semantischer Strukturen eine immer grössere Bedeutung, während lange Zeit die formal-logischen Repräsentationsstrukturen vorgeherrscht hatten, insbesondere die Prädikatenlogik, deren Operationen streng° syntaktisch sind, d.h. Schlußfolgerungen nach rein formalen Regeln abgeleitet werden, ohne daß die Bedeutung der Wissensinhalte irgendeinen

Stellenwert einnimmt. Die prädikatenlogischen Repräsentationsstrukturen haben insofern auch heute noch eine große Relevanz, als die Programmiersprache PROLOG eben darauf basiert und bei der Konzeption von vielen wissensbasierten Systemen angewandt wird.

Semantischen Netzwerke sind, ebenso wie Frames und Scripts, gegenüber den logischen Formalismen deutlich mehr am Wissensinhalt orientiert; ihre Ableitungsregeln sind weniger abstrakt als vielmehr spezifisch auf die Objekte bezogen. Rich (40) äußert in diesem Zusammenhang die Überzeugung, daß syntaktische Repräsentationsstrukturen zwar die Vorteile von Widerspruchsfreiheit, Eindeutigkeit und Gültigkeit der Inferenzen aufweisen und auch für kleinere Problembereiche adäquat seien, daß sie jedoch bei größeren Wissensgebieten aufgrund ihrer Generalität ineffektive und aufwendige Suchprozesse zur Folge haben. Die als "ad-hoc methods" (41) bezeichneten semantischen Repräsentationsstrukturen sind dagegen durch die objektspezifische Verankerung von problemorientierten Suchstrategien effektiver, so daß im Zuge zunehmend größer werdender Wissensbasen oftmals den semantischen Strukturen der Vorzug gegeben wird gegenüber den streng logischen.

Zusätzlich lassen sich mit den semantischen Formen der Wissens- repräsentation Schemata und stereotypisierte Abläufe von Situationen und Ereignissen leicht darstellen, d.h. Regelmäßigkeiten und Muster von Phänomenen in Wissensbasen können so leichter implementiert werden. Schemata stellen aber, wie bereits Piaget erkannte (42) ein wesentliches Element des menschlichen Wissens dar, so daß entsprechend konzipierte Repräsentationsstrukturen in all jenen Gebieten besondere Vorteile bieten, die durch schematisierte Prozesse gekennzeichnet sind. "By using schema, people, as well as programs, can exploit the fact that the real world is not random" (43). Zwar lassen sich Ausschnitte der realen Welt nicht ausschließlich durch standardisierte Muster und Kategorien repräsentieren, doch bieten derartige Objekt- und Situationsschemata eine wichtige Basis für eine computerinterne Darstellung von Situations- und Objekterwartungen, wie sie für das menschliche Wissen typisch sind. Die Grenzen derartiger Repräsentationen werden in späteren Kapiteln noch deutlich werden. Im Folgenden werden die wichtigsten, innerhalb der Künstlichen Intelligenz entwickelten, Strukturen zur Repräsentation von Wissen dargestellt: die formallogischen Repräsentationen, semantische Netzwerke, Frames, Scripts, prozedurale Strukturen und Produktionsregeln.

2.2 Formallogische Wissensrepräsentation

2.2.1 Allgemeine Grundlagen

Die Formale Logik nimmt einen wesentlichen Stellenwert unter den Strukturen zur Repräsentation von Wissen in Computern ein. Ihre Relevanz ergibt sich vor allem daraus, daß die Programmiersprache PROLOG, neben LISP die wichtigste KI-Sprache, unmittelbar auf pradikatenlogischen Formalstrukturen basiert. PROLOG stellt gerade jene Programmiersprache dar, die für die Entwicklung von Expertensystemen, vor allem im europäischen und japanischen Raum, von ganz entscheidender Bedeutung ist. So sollen im Folgenden grundlegende Prinzipien der Aussagen- und der Prädikatenlogik dargestellt werden, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf die Formalstrukturen gelegt wird.

Bis zum 19. Jahrhundert galt die aristotelische Logik als Teilgebiet der Philosophie. Sie erfuhr bis zu diesem Zeitpunkt kaum eine qualitativ wesentliche Änderung ihrer Grundlagen, so wie sie auf Aristoteles zurückgingen. Erst durch die wichtigen Weiterentwicklungen gegen Ende des letzten Jahrhunderts durch Frege, De Morgan und Boole sowie im 20. Jahrhundert durch Russell, Carnap, Tarski und Whitehead wurde sie als FORMALE LOGIK zum eigenständigen Gebiet, das in vielen Wissenschaftszweigen erhebliche Bedeutung gewann. Vor allem aber für die Entwicklung von Systemen der Künstlichen Intelligenz war sie von fundamentaler Relevanz, da auf ihrer Basis erst die Repräsentation von Wissen und die Implementation von Ableitungsregeln realisiert werden konnten.

In der philosophischen Tradition wurde die Logik allgemein als "Lehre vom Begriff, eine Lehre vom Urteil und eine Lehre vom Schluß" (44) angesehen; die Formale Logik wird dagegen vornehmlich als "Theorie des Schließens" (45) begriffen. Die hier verwandte Bezeichnung "formal" weist auf die rein syntaktische Konfiguration der Inferenzen hin, d.h. auf die Tatsache, daß die Gültigkeit logischer Schlüsse unabhängig von der den Aussagen immanenten Bedeutung ist. "Solche Schlüsse, die gültig sind aufgrund abstrakter begrifflicher Beziehungen, nicht aber aufgrund der besonderen sachbezogenen Bedingungen...nennt man formalgültig" (46). Die im Zuge der Formalen Logik stattfindende Einführung künstlicher Symbole führte zu der ebenfalls weitverbreiteten

Bezeichnung "symbolische Logik" (47). Die im Rahmen logischer Formalisierung verwandten Zeich werden hier als Symbole bezeichnet, eine Begriffsauffassung, die innerhalb der Künstlich Intelligenz als typisch erachtet werden kann.

2.2.2 Aussagenlogik

Im Folgenden wird zunächst die Aussagenlogik dargestellt, d.h. jener Bereich der Formalen Logik der sich auf die Betrachtung von Sätzen und Satzkombinationen beschränkt. Die Aussagenlogik is im wesentlichen durch zwei Teilbereiche determiniert: die Axiome eines Systems (alles, wa gesagt, d.h. formalisiert werden kann) und die Inferenzregeln (alles, was abgeleitet werde kann). Damit beschäftigt sich die Aussagenlogik vornehmlich mit der Form oder Syntax ihre Aussagen selbst sowie mit den Schlußfolgerungen, die von den Aussagen abgeleitet werden Aussagen, die nach den Bedingungen der Formalen Logik jeweils durch Variablen repräsentier werden können, sind Sätze, denen man den Wahrheitswert 'wahr'oder 'falsch' zuordnen kann; die impliziert den Ausschluß von Meinungen, Fragen, Ausrufen und Überzeugungen, also allen inter sionalen und vagen Aussagen. Ebenso werden Sätze mit Indikatoren, d.h. Worten, die auf beliebig andere Worte weisen, in der Aussagenlogik nicht berücksichtigt (48), da auch diese logisch nich beurteilbar sind, es sei denn, man ersetzte die Indikatoren so durch konkrete Begriffe, dass di Aussagen als wahr oder falsch klassifizieren sind. Das Postulat der Wahrheitsdefinition laute demgemäß: "Jeder Aussagesatz, der keine Indikatoren enthält, ist entweder wahr oder falsch"(49) Sprachlich werden Aussagen durch deklarative, indikative Sätze ausgedrückt, "deren Bedeutung i Prinzip als unabhängig von der jeweiligen Sprech- situation anzusehen ist" (50).

Aussagen können durch verschiedene Junktoren miteinanderverknüpft werden. Damit sind Satzkom binationen zugelassen. Folgende Verknüpfungen zaehlen zu den wichtigsten in der Aussagenlogik:

1. die Konjunktion = Und-Verknüpfung (umgangssprachlich: "sowohl - als auch", "nicht nur - sondern auch", "und");

2. die Disjunktion = Oder-Verknüpfung (umgangssprachlich: "oder", "außer wenn", "es sei denn");

3. die materiale Implikation = Wenn - Dann - Verknüpfung, auch Subjunktion genannt (umgangssprachlich: "wenn - dann");

4. die materiale Äquivalenz: = Bijunktion (umgangssprachlich: "genau dann, wenn");

5. die Negation (umgangssprachlich "nicht") (51).

Diesen Aussageverknüpfungen sind jeweils gültige Wahrheitswertetabellen zugeordnet, die über de Wahrheitsgehalt der Aussagekombinationen Aufschluß geben auf der Grundlage der Gültigkeit de Einzelaussagen. Exemplarisch wird im Folgenden eine Wahrheits- wertetabelle demonstriert, die für die materiale Implikation, d.h. die logische Wenn-Dann-Verknüpfung gilt:

Formel: $A \rightarrow B$
Wahrheitswerte:

A = wahr, B = wahr; $A \rightarrow B$ = wahr
A = wahr, B = falsch; $A \rightarrow B$ = falsch
A = falsch, B = wahr; $A \rightarrow B$ = wahr (!)
A = falsch, B = falsch; $A \rightarrow B$ = wahr.

Die einzelnen Formeln lassen sich mit jeweils unterschiedlichen Junktoren ausdrücken; entschei- dend ist allein, daß der Wahrheitsgehalt der Aussagekombination äquivalent bleibt. Die erlaubten formalen Transformationen von Aussagen richten sich demnach stets nach der Gültigkeit der Wahrheitswertetabellen, d.h. es handelt sich um rein syntaktische Operationen, deren seman- tischer Gehalt für die formale Äquivalenz keine Rolle spielt. So kann z.B. die materiale Implikation folgendermassen transformiert werden, ein Vorgang, der beim spaeter noch ausfuehr- licher dargestellten Resolutionsverfahren von enormer Wichtigkeit ist:

$A \rightarrow B = \neg A \vee B.$

Befürwörter der formalen Aussagenlogik gehen davon aus, daß sich sämtliche deklarativen Sätze formallogisch übersetzen lassen. Unberücksichtigt bleiben bei einer solchen Burteilung jedoch

beispielsweise die semantisch bedeutsamen Verbindungs- und Füll- wörter (z.B. aber, jedoch, und...), die teilweise in der formal- sprachlichen Übersetzung gleiche Junktoren aufweisen, obwohl ihr Bedeutungsgehalt unterschiedlich ist.

Folgendes Beispiel mag der Illustration dienen: Der Satz "Er spielt Klavier, aber sie singt"(52) wird formallogisch übersetzt in: p UND q. Damit ist diese Repräsentation der folgenden umgangssprachlichen Aussage äquivalent: "er spielt Klavier, und sie singt", obwohl beide Sätze semantisch different sind. Dieses Beispiel kann lediglich als Hinweis dafür dienen, daß die direkte Transformation natürlicher Sätze in die Formalstrukturen der Aussagenlogik in vielen Fällen eine Reduktion semantischer Informationen impliziert. Die Transformation von Wissen in Computern auf der Basis aussagen- logischer Strukturen ist damit nur bedingt möglich, lassen sich doch ohne wesentlichen Verlust von Bedeutungsgehalt lediglich einfach strukturierte, deklarative Sätze in eine Wissensbasis integrieren. Ergänzung findet die reine Faktenrepräsentation durch die Integration von Inferenzmechanismen, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.2.3 Inferenzen in der Aussagenlogik

Die Möglichkeit, Schlußfolgerungen aus vorhandenen aussagen- logischen Satzen abzuleiten, stellt eine entscheidende Erweiterung formallogischer Wissensrepräsentation dar. Die Aussagenlogik beinhaltet Regeln über gültige Ableitungs- mechanismen, die gewährleisten, daß entsprechende Inferenzen als zulässig betrachtet werden können. "The power of logic lies in the fact that the new sentence is assured to be true if the original sentences were true" (53).

Die bekannteste, am häufigsten benutzte Inferenzregel ist der "modus ponens"". Die Formel der Ableitung lautet:

$$\frac{p \quad (= \text{der Himmel ist rot}) \qquad p \rightarrow q \quad (= \text{wenn der Himmel rot ist, dann geht die Sonne auf})}{q \quad (= \text{die Sonne geht auf})}$$

Der Modus Ponens bietet damit die Möglichkeit, aus feststehenden Fakten und klar definierten Zusammenhängen neue Fakten zu schließen, d.h. im obigen Fall kann aus den existierenden Informationen p und $p \rightarrow q$ die Tatsache q abgeleitet werden. Auf Computerwissensbasen bezogen bedeutet dies, daß nicht alle Fakten explizit im Datenspeicher verankert werden müssen, sofern relevante Informationen durch aussagenlogische Ableitungen vom System selbst geschlossen werden können. Der Modus Ponens impliziert die Gültigkeit des vollzogenen Schlusses, d.h. die neu ermittelte Tatsache kann als wahr gelten, sofern die jeweiligen Prämissen wahr sind. Auf der Basis dieser Inferenzregel ist eine erhebliche Erweiterung der Anwendung des implementierten Wissens möglich.

Weitere Inferenzregeln der Aussagenlogik sind:

Modus tollens:

$$\frac{p \rightarrow q \quad (= \text{wenn p, dann q}) \qquad \neg q \quad (= \text{nicht q})}{\neg p \quad (= \text{nicht p})}$$

Modus barbara:

$$\frac{p \rightarrow q \quad (= \text{wenn p, dann q}) \qquad q \rightarrow r \quad (= \text{wenn q, dann r})}{p \rightarrow r \quad (= \text{wenn p, dann r})}$$

Regel zur Kontraposition:

$$\frac{p \rightarrow q \quad (= \text{wenn p, dann q})}{\neg q \rightarrow \neg p \quad (= \text{wenn nicht q, dann nicht p})}$$

und deren Umkehrregel:

$$\frac{\neg p \rightarrow \neg q \quad (= \text{wenn nicht p, dann nicht q})}{q \rightarrow p \quad (= \text{wenn q, dann p})}$$

Während der Modus Tollens und der Modus Barbara zu den häufig benutzten Inferenzregeln zählen stellen die beiden anderen Regeln eher eine Seltenheit dar, da sie umkehrbar eindeutige Gegensatzpaare der Aussagen voraussetzen, die in der Umgangssprache selten derartig präzise determiniert werden können.

Insgesamt betrachtet spielt die Aussagenlogik in der formal- logischen Repräsentation von Wissen in Computern keine wesentliche Rolle, obwohl einige der ihr zugrundeliegenden methodologischen Konzepte, wie beispielsweise der Modus Ponens, Einfluß genommen haben auf die Konzeption von KI-Methoden (54). Die Aussagenlogik bietet jedoch zu geringe Möglichkeiten, Eigenschaften von Objekten und Relationen zwischen Objekten formallogisch darzustellen. Da jedoch die Eigenschafts- und Beziehungszuweisung einen wesentlichen Aspekt bei der Darstellung von Objekten ausmacht, ist die Prädikatenlogik als weitaus bedeutenderer Teil in der formallogischen Wissensrepräsentation zu begreifen.

2.2.4 Die Prädikatenlogik

Die Prädikatenlogik erster Ordnung wird, ebenso wie die Aussagenlogik, als vollständig begriffen, d.h. alle Sätze innerhalb eines Systems gelten als ableitbar. Die Prädikatenlogik bietet gegenüber der Aussagenlogik, deren Ausdrucksmittel sich auf Aussagenvariablen, -konstanten und Junktoren beschränken, zusätzliche Elemente: die Subjektvariablen, -konstanten, die Prädikatenvariablen, -konstanten und die Quantoren.

In der Prädikatenlogik werden einfache Aussagen analog dem umgangssprachlichen Subjekt-Prädikat - Schema zerlegt. Dabei entsprechen einfache Aussagen solchen Sätzen, "in denen einem Individuum (Objekt, Ding) eine Eigenschaft zugesprochen wird oder das Bestehen einer Beziehung zwischen einer gewissen Anzahl von Individuen behauptet wird" (55). So impliziert die Prädikaten- logik die eindeutige Zuordnung von Attributen zu Objekten als auch die Darstellung von Objektrelationen. Die Eigenschaften bzw. die Bezeichnung von Relationen werden als Prädikate bezeichnet. Die einfache Eigenschaftszuweisung wird mit den Formalismen der Prädikatenlogik erster Ordnung repräsentiert; mehrstellige Prädikate, wie z.B. die zweistellige Zuordnung: p ist größer als q sind hier ebenfalls erlaubt. Dabei stellt sich die formal- logische Repräsentation einer einstelligen bzw. zweistelligen Eigenschaftszuweisung wie folgt dar:

das Haus ist groß	= groß (Haus)	= P(x)
bzw.: Hans ist kleiner als Peter	= kleiner (Hans, Peter)	= P(x,y)

Prädikate repräsentieren eine Klasse von bestimmten Individuen oder Objekten, die durch die Eigenschaft P gekennzeichnet sind, d. h. wenn gilt, daß P(x), P(x,y)..., dann gehören x und y der Klasse von Objekten an, für welche die Eigenschaft P gilt. Die Variablen x und y sind damit durch jedes Objekt der entsprechenden Klasse ersetzbar. (Dieser Mechanismus wird in der Programmiersprache PROLOG angewandt, um Eigenschaftszuweisungen vorzunehmen und bei Benutzerfragen auszugeben).
Die Prädikatenlogik impliziert eine Anzahl von Formeln, die über gültige Aussageformen und -kombinationen Aufschluß geben. So sind hier ebenso wie in der Aussagenlogik Junktoren als Verknüpfungsinstanz erlaubt; zusaetzlich existieren jedoch in der Prädikatenlogik sogenannte Quantoren, die existenzquantifizierte sowie allgemeingültige Aussagen zulassen; der "Generalisator" (umgangssprachlich = "für alle x gilt:") wird durch die Formel $\wedge$ ausgedrückt, der "Partikularisator" (umgangssprachlich = "für einige x gilt") bzw. "es gibt", durch das Zeichen $\vee$ (56). Wahrheitswertetabellen ermöglichen zudem die Bestimmung der Gültigkeit eines Satzes und der Zugehörigkeit eines Satzes zu einer Aussagenmenge.

Beispiele für prädikatenlogisch formalisierte Sätze sind z.B.:

Wenn gilt:
  x = Individuum;
  F = Eigenschaft Mensch;
  E = Eigenschaft sterblich,
dann wird die Aussage
  "Wenn x ein Mensch ist, dann ist x sterblich"
wie folgt ausgedrückt:
  (Fx $\rightarrow$ Ex);
als allquantifizierte Aussage:
  $\wedge$x (Fx $\rightarrow$ Ex).

Eine andere, existenzquantifizierte Aussage wäre etwa folgende:
Vx (Römer(x) → loyal_gegenüber(x,Cäsar) v haßt(x,Cäsar);
der umgangssprachlich entspräche:
Es existiert mindestes ein Individuum, das,
wenn es ein Römer ist,
entweder loyal gegenüber Cäsar ist
oder aber Cäsar haßt (57).

Obwohl nur in simplifizierter Form dargestellt, läßt sich anhand obiger Beispiele ahnen, daß sich mit der Prädikatenlogik, besonders durch die Einbeziehung allgemein- und existenz- quantifizierter Aussagen Fakten weitaus differenzierter formalisieren lassen als mit der Aussagenlogik.

2.2.5 Inferenzregeln der Prädikatenlogik

Die Inferenzregeln der Prädikatenlogik ermöglichen die Ableitung von Objekteigenschaften und -beziehungen, die nicht explizit in einer Wissensbasis verankert sind. Die Inferenzregeln schließen darüberhinaus aber auch die Quantoren mit ein. So kann z.B. aus einer allgemeingültigen Aussage auf ein spezielles Argument geschlossen werden. Zudem sind bei einer als ausreichend definierten Menge existenzquantifizierter Zuordnungen allgemeingültige Aussagen inferierbar.

Als Prinzip prädikatenlogischer Schlußfolgerungen gilt die Einführung oder Elimination von Quantoren. Die Methode der "universal specialisation" (58) beinhaltet beispielsweise die Entfernung des allquantifizierten Faktors. Auf das damit unmittelbar verknüpfte Resolutionsverfahren - eine effektive Inferenzmethode der Prädikatenlogik - wird später noch ausführlicher eingegangen. Erweiterungen der strengen Prädikatenlogik implizieren den möglichen Einsatz von Funktionen (Funktoren)(59) und die Integration des Gleichheitszeichens als Ausdrucksmittel für Identität (60). Die Funktoren erlauben durch Zugriff auf die Einzelprädikate und deren Verknüpfung entsprechend der Funktionsdefinition die Zuordnung neuer Prädikate alleine auf der Basis der bestehenden Relationen. So könnte beispielsweise in PROLOG eine Funktion 'Ist-Onkel-von' bei entsprechender Definition ('Ist-männlich' UND 'Geschwister-ist-Elternteil-von') die Abfrage dieser konkreten Verwandtschaftsbeziehung beantworten, ohne daß den Argumenten je das Prädikat 'Ist-Onkel-von' selbst zuwiesen worden wäre. Diese Erweiterung bietet wohl den Vorteil zusätzlicher Formalismen, büßt aber gleichzeitig die Möglichkeit zur Bildung allgemeingültiger Aussagen ein und ist im Gegensatz zur Logik erster Ordnung nicht mehr vollständig und fehlerfrei. Die wichtigsten KI-Programmiersprachen LISP und PROLOG bieten gute Voraussetzungen für die Implementation prädikatenlogischer Formeln in Computerwissensbasen. LISP ermöglicht über sogenannte "property lists" (61) die Zuweisung von Eigenschaften zu einem Objekt und damit die direkte Verfügbarkeit von Attributen, während PROLOG, wie bereits oben erwähnt, auf der Grundlage des Pradikatenkalküls entwickelt wurde, d.h. die unmittelbare formallogische Transformation von Wissen zuläßt und Inferenz- strategien beinhaltet, die den prädikatenlogischen Ableitungsregeln entsprechen.
Die formallogische Repräsentation erlaubt nicht nur Objekt- beschreibungen, sondern läßt auch Darstellungen von Zuständen° zu (63). So wird z.B. die Situation, in der ein Roboter eine Schachtel trägt, während er bei Tisch A steht, formallogisch wie folgt repräsentiert:

TABLE (A)	—	A ist ein Tisch
AT (Robot,A)	—	der Roboter befindet sich bei Tisch A
HOLD (Robot, box)	—	der Roboter hält eine Schachtel

Die formallogische Repräsentation von Zustandsänderungen würde sich so ausdrücken lassen: der Satz: 'der Roboter legt die Schachtel auf den Tisch A', würde unter Beibehaltung der beiden ersten Ausdrücke der ursprünglichen Repräsentation, wie folgt formalisiert:

NOT(HOLD(Robot,box))	—	der Roboter hält die Schachtel nicht
ON(box, A)	—	die Schachtel ist auf Tisch A (64).

Es wird hier deutlich, daß Prozesse in der Formalen Logik als diskrete Zustandsänderungen beschrieben werden, d.h. Prozesse lediglich durch Statusmodifikationen der jeweils deklarativ repräsentierten Zustände erkennbar sind. Ob mit diesem statischen Konzept stetig ablaufende Prozesse zu fassen sind, bleibt allerdings fraglich.

2.2.6 Einschätzung der formallogischen Wissensrepräsentation

Formallogische Repräsentationen zur Verankerung von Wissen weisen einige Vorteile gegenüber anderen Formen auf. So nennt Mylopoulos (65) als wichtigsten Punkt die Schlußfolgerungsregeln deren syntaktische Gültigkeit innerhalb eines definierten Systems angenommen werden kann. Die Verständlichkeit und Reinheit der formalen Struktur wird ebenfalls als positives Kriterium angeführt. "In this formalism, we can conclude that a new statement is true by proving that it follows from the statements that are already known" (66). Die Simplizität der Formalisierung als auch die einfache Reformulierbarkeit prädikatenlogischer Ausdrücke zählen zu den weiteren Vorzügen. Barr/Feigenbaum (67) und Filman (68) begreifen diese gar als natürliche Form der Wissensrepräsentation: "the expression of a problem in logic often corresponds to our intuitive understanding of the domain" (70).

Die Modularität formallogischer Ausdrücke und das damit einhergehende Fehlen prozeduraler Informationen stellt aber andererseits einen wesentlichen Nachteil logischer Strukturen dar. Auf den Schwierigkeiten, heuristisches oder prozedurales Wissen mit den deklarativen Repräsentationen zu verknüpfen, beruhen besonders bei großen Datenbasen entscheidendes Defizite. Ein zusätzliches Problem ergibt sich bei der Übersetzung umgangsprachlicher Sätze in die logische Formalsprache. Dies liegt einerseits an der typischen Ambiguität alltagssprachlicher Formulierungen, der Fülle an Indikatoren und unbestimmten Begriffen sowie daran, daß in den natürlichen Aussagen viele Informationen nicht explizit ausgedrückt werden, da der Mensch aufgrund seiner Erfahrung diese unwillkürlich hinzuaddiert. In einer maschinellen Wissensbasis jedoch muß jede dieser latenten Informationen explizit verankert werden oder aber zumindest die Möglichkeit einer gültigen Schlußfolgerung gegeben sein, die jene Informationen inferiert.

Eines der größten Probleme formallogischer Wissensrepräsentation liegt im Umgang mit den Daten. Das Fehlen von ordnenden Organisationsprinzipien und von Kontrollstrukturen, die den problemadäquaten Zugriff auf das gespeicherte Wissen ermöglichen, führt zu sehr langsamen und ineffektiven Suchprozeduren bei großen Datenmengen und Unübersichtlichkeit, wenn hierzu noch komplexe Funktoren kommen ("combinatorial explosion" (71)). Infolgedessen werden formallogische Repräsentationen vorwiegend in jenen Bereichen angewandt, die nicht nur eine relativ unproblematische Transformation des Wissens in logische Formalstrukturen zulassen, sondern die zudem nicht die Verankerung einer grossen Zahl von Daten erfordern.

Die Simplizität logischer Formalismen bedingt, daß sich komplexe Zusammenhänge der realen Welt bzw. des Wissens über diese kaum befriedigend abbilden lassen. Die Notwendigkeit, innerhalb der logischen Formalsprache Begriffe eindeutig zu definieren, ist lediglich ein Beispiel für die Unmöglichkeit, menschliches Wissen über Wirklichkeit mit Hilfe von logischen Formeln hinreichend abzubilden. Die Probleme, die sich aus dem Versuch einer derartigen Transformation ergeben, werden in späteren Kapitel ausführlicher behandelt werden.

2.3 Semantische Netzwerke

2.3.1 Allgemeine Grundlagen

Eine weitere wichtige Repräsentationsstruktur ist das semantische Netzwerk. Bei der Darstellung dieser Netzwerke stellt sich das Problem, daß eine klare und präzise Beschreibung dieser Form der Wissensdarstellung schwierig ist angesichts sehr differenter Entwürfe und Anwendungen(72). Im Folgenden wird dennoch versucht, einige grundlegende Charakteristika von semantischen Netzwerken zu beschreiben.

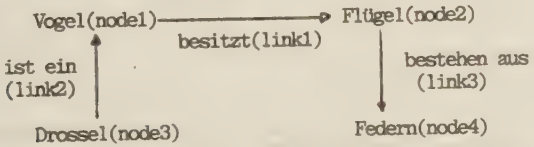
Semantische Netzwerke repräsentieren Wissen durch eine bestimmte Anzahl von Objekten (graphisch durch Knoten dargestellt) und durch Verbindungen zwischen diesen Objekten (graphisch durch etikettierte Verbindungen bzw. Kanten illustriert). "Semantische Netzwerke sind als graphische Veranschaulichung prädikatenlogischer Formeln entstanden"(73). Sie wurden ursprünglich mit dem Ziel konzipiert, die Bedeutung englischer Wörter darzustellen(74) und dienen heute der Repräsentation komplexer Wissensinhalte. Kennzeichnend für die semantischen Netzwerke ist die graphische Darstellung von Objekten und Objektbeziehungen. Obwohl die Implementation in Computerprogramme auf der Basis der zweistelligen Prädikatenlogik erfolgt(75), sind semantische Netzwerke insofern als differente Repräsentations- formen zu begreifen, als die graphische Notation von Objektverknüpfungen eine bessere Überschaubarkeit der Wissensdarstellung für den Benutzer bringt und einen problemloseren Überblick über Objektabhängigkeiten ermöglicht, als dies mit den abstrakten Formeln der Prädikatenlogik zu realisieren ist.

Man versucht, durch die graphische Darstellung bedeutungsverwandte Objekte bzw. Begriffe und Begriffkomplexe in einem Netzwerk zu fassen. So geht dieses Konzept über die prädikatenlogische Formalisierung insofern hinaus, als die semantische Dimension im Netzwerkmodell Berücksichtigung findet. So lag diesem Konzept ursprünglich die Absicht zu Grunde, das menschliche Gedächtnis strukturell nachzubilden, um damit einerseits leistungsfähigere Wissenssysteme zu entwickeln und andererseits durch derartige Modellbildungen Erkenntnisses über die Organisation des menschlichen Gedächtnisses zu gewinnen.

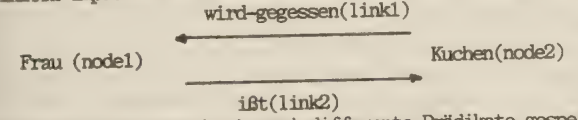
2.3.2 Die Struktur semantischer Netzwerke

Die Struktur semantischer Netzwerke ist durch zwei unter- schiedliche Faktoren gekennzeichnet:
- die Knoten (graphisch als Rechtecke, Punkte oder Kreise markiert), die Objekte, Situationen oder Begriffe repräsentieren und als "Knoten mit Individuennamen"(76) bzw. als "nodes"(77) bezeichnet werden;
- die Verbindungen (graphisch durch Pfeile oder lineare Verknüpfungen gekennzeichnet), die die Relationen zwischen den Knoten oder die Eigenschaften von Objekten determinieren und "Knoten mit Prädikatennamen"(78) oder "links" bzw. "arcs" genannt werden (79).

Objekte und Objektverbindungen sind jeweils mit einer Bezeichnung versehen, um so semantische Aspekte in die Netzwerke zu integrieren. Diese Notation gilt durchgängig für alle semantischen Netzwerke, unabhängig vom Inhalt oder von der Zielsetzung der wissensbasierten Systeme. Folgendes Beispiel diene der Illustration:



Auch bilaterale Verbindungen zwischen Knoten sind möglich, obwohl diese im Computer jeweils einzeln implementiert werden müssen (81). So wird der folgende Graph



im Computerprogramm durch zwei differente Prädikate gespeichert:

Ißt(Frau,Kuchen) ; Wird-Gegessen(Kuchen,Frau).

Semantisch unterschiedliche Verknüpfungen zwischen zwei Objekten können also explizit in den Netzwerken veranschaulicht werden(82). Man nimmt daher innerhalb der KI-Forschung an, daß die Repräsentation komplexer Begriffe in semantischen Netzwerken durch eine begriffsadäquate Anzahl von Knoten und Verknüpfungen realisierbar sei; "Die Bedeutung eines Begriffes ist das Gesamt der Knoten, mit denen der zu definierende Knoten durch Zeiger verbunden ist"(83).

Semantische Netzwerke bieten den Vorteil semantisch strukturierter Wissensrepräsentation durch die Möglichkeit der Klassifikation von Objekten. Dies erfolgt

1. über die Differenzierung zwischen Exemplar und Typen, z.B. John(Merkmal) : Student,männlich(Typ)(84);

2. über die Aggregation von Daten, d.h. die Verbindung eines Objektes mit seinen Teilen, z.B. Objekt = Familie → Teile = Mutter, Vater, Bruder...;

3. Generalisierung, d.h. ein Objekt wird einer generelleren Klasse zugeordnet;

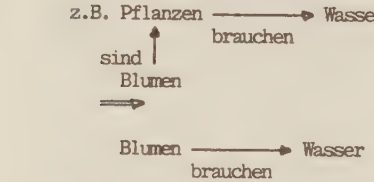
4. Aufteilung, "partition"(85), d.h. Integration der Objekte in hierarchisch strukturierte Felder zur Limitierung der Eingabe von Objektmerkmalen, d.h. wenn A hierarchisch über B angeordnet ist und ein spezifisches Objekt x der Klasse B zugewiesen wird, ist x automatisch auch Element der Klasse A; z.B. A = Menge aller (Pflanzen),

B = Menge aller (Bäume), x = Esche und x = Element der Klasse B ⟶ x ist auch Element der Menge A ⟶ x ist eine Pflanze.

Auf der Basis dieser spezifischen Repräsentation von Objekt- klassen kann eine Einschränkung d explizit in eine Wisssensbasis zu verankernden Fakten erreicht werden, nämlich durch d sogenannten "inheritance hierarchies"(86), die Vererbungshierarchien. Durch die hierarchisc Darstellung der Objekte läßt sich die Klassenzugehörigkeit eines Objektes einer untergeordnet Klasse auch für die jeweiligen übergeordneten Klassen ableiten, z.B. durch sog. "ISA-link (Rich, S.219):

(Tiger) —ISA→ (Säugetier)
(Säugetier —ISA→ (Tier)
⟹
(Tiger) —ISA→ (Tier)

Die semantischen Netzwerke werden demnach nicht zu unrecht oft als "natürliche" Repräsentation schemata für Wissensgebiete bezeichet, die eine Klassifizierung der Objekte benötigen, z. Wissensbasen im Bereich der Biologie(87). Ebenso können durch Eigenschaftsvererbungen, d sogenannte "property inheritance" (89), Attributzuweisungen, die höheren Knoten beigeordn sind, automatisch als gültig auch für die hierarchisch untergeordneten Knoten angenommen werde ohne daß diese Eigenschaften explizit den unteren Knoten zugewiesen werden müssen;

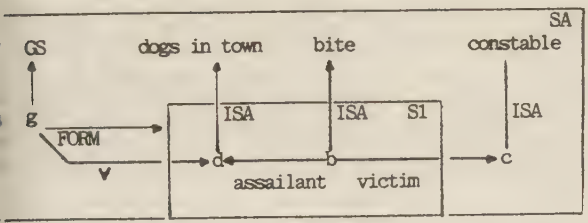


Diese Form der Repräsentation von Wissen impliziert die Veranschaulichung von Objektzusamme hängen: "Semantic networks of this sort are useful for desriptive purposes because they give simple, structural picture of a body of facts."(90).

Neben der Verankerung von Objekt-Eigenschaften und -relationen bemüht man sich innerhalb de KI-Forschung - in Analogie zur Prädikatenlogik - um die Integration allquantifizierter un existenzquantifizierter Aussagen in semantische Netzwerke. Die in der alltäglichen Kommunikatio so häufigen Wörter wie "ein", "jemand" oder "jeder" können durch besondere Markierung de jeweils entsprechenden Knoten gekennzeichnet werden (gestrichelte Knoten entsprechen allquanti fizierten Aussagen ; so wird z.B. die Aussage "Alle Raben sind Schwarz" in einem Netzwerk wi folgt repräsentiert:

Ebenso lassen sich logische Verknüpfungen in semantischen Netzwerken graphisch darstellen; si werden durch gestrichelte Linien und eine spezielle Bennenung der "links" gekennzeichnet.

Um das oben Gesagte zu illustrieren, soll im Folgenden der Vorschlag von Rich (91) aufgegriffe werden, durch die Methode des sogenannten "Partitioning" allquantifizierte Variablen in Seman tischen Netzwerken darzustellen. Ein normalsprachlicher Satz wird in der üblichen Form darge stellt, während ein Satz mit Anspruch auf Allgemeingültigkeit durch folgende Operationen al solcher gekennzeichnet wird: zunächst wird eine Oberklasse von allgemeingültigen Sätzen durc den Oberknoten "GS" determiniert, dem der spezielle Satz "g" als Element dieser Klasse unterge ordnet ist. Die Relationen der einzelnen Objekte von "g" werden durch graphische Umrandun abgespalten ("partitioned") und durch das Prädikat "form" Relation "g" zugeordnet. Von "g" weis ein Prädikat " ∀ " zu all jenen Elementen des abgespaltenen Satzes, die allquantifiziert sind Ist ein Element des Satzes "g" ein spezifisches statt allgemeines Objekt, muß dieses außerhal der abgespaltenen FORM repräsentiert sein, da dieser Teil der Aussage keine Allgemeingültigkei mehr besitzt. Die graphische Darstellung stellt sich folgendermaßen dar:



Er bedeutet in normalsprachlicher Übersetzung: "Every dog in town (d) (allquantifiziert durch) has bitten (b) the constable (c)" (spezifisches Element, daher außerhalb von S1)(92).

Der hier dargestellte Teilausschnitt SA ist innerhalb eines komplexen Gefüges von semantischen Netzwerken lokalisiert. Durch eine hierarchische Strukturierung dieser "partitioned semantic nets"(93) wird ein direkter Zugriff auf diejenigen Netzwerke ermöglicht, die für eine spezifische Aufgabe relevant sind.

2.3.3 Schlußfolgerungsmöglichkeiten in semantischen Netzwerken

Wie anfangs bereits erwähnt, ist neben der reinen Repräsentation von Fakten und ihren Beziehungen zueinander die Implementation von Schlußfolgerungsmöglichkeiten ein wesentlicher Bestandteil von Computerwissensbasen. Die Struktur der semantischen Netzwerke bietet hier einige Möglichkeiten, die sich beispielsweise an Suchprozeduren zeigen lassen. Die Suche nach einem bestimmten Objekt erfolgt entlang den spezifischen Verknüpfungen in einem Netzwerk. In a semantic net the program can start at one node of interest, follow arcs to related nodes, then follow arcs from those to still more distantly related nodes, and so on" (94). Ist ein Objekt bzw. eine Objektklasse identifiziert worden, können systemintern Objekteigenschaften inferiert werden, die nicht explizit in der Wissensbasis verankert sind. Ebenso kann durch sogenannte "matching network structures" (95) ein Vergleich von externen Daten mit den gespeicherten Netzwerken vorgenommen werden, eine Methode, die für text"verstehende" Programme und für Frage-und-Antwort-Systeme von außerordentlicher Bedeutung ist. Durch die Konstruktion eines "network fragment"(96), in dem die externen Daten verankert werden, wird die Basis geschaffen für die Anwendung sogenannter "pattern-matching" Prozeduren, die einen Vergleich zwischen den externen Fakten und den Netzwerken der Computerwissensbasis durchführen. Dabei werden nicht nur die jeweils adäquaten Netzwerke eruiert, sondern auch "leere Stellen" ausgefüllt, d.h. bislang unbekannte Eigenschaften externer Objekte können so ermittelt werden.

Für die Ableitung nicht explizit verankerter Informationen sind - wie oben bereits angedeutet - die Vererbungshierarchien in semantischen Netzwerken von großer Bedeutung. Diese Verbindungen erlauben z.B. die Extrapolation von Eigenschaften einer Objektklasse auf ein dieser Klasse zugehöriges Objekt, selbst wenn diese nur für bestimmte Objekte bekannt sind. Ebenso ist die Zuordnung eines Objektes zu einer Klasse durch Vergleich der bekannten Eigenschaften mit denen der Objektklasse möglich. Soll z.B. die Klassenzugehörigkeit eines Tieres bestimmt werden, wobei als externe Daten lediglich die Tatsachen bekannt sind, daß das Tier Flügel hat und Eier legt, so ist mithilfe der Matching- und Inferenzprozeduren die Schlußfolgerung möglich, daß dieses Tier zur Klasse der Vögel gehört. Dieses für manchen Betrachter einfach anmutende Beispiel offenbart die Fähigkeit, eigenständige Schlußfolgerungen ohne vorherige Kenntnis dieser spezifischen Objekteigenschaften zu ziehen und demonstriert damit eine Fähigkeit, die Menschen tagtäglich benutzen. "The matcher can make inferences during the matching process to create network structure that is not explicitly present in the network"(97). Ähnliche Inferenzmöglichkeiten bieten die oben ebenfalls bereits erwähnten "porperty inheritances", die Eigenschaftsbestimmungen auch bei nicht expliziter Verankerung in der Datenbasis zulassen.

2.3.4 Einschätzung von semantischen Netzwerken

Die Fähigkeit, durch Schlußfolgerungen neues Wissen über Objekte zu eruieren, birgt jedoch auch Fehler und Probleme in sich. So besteht zum Beispiel die Gefahr, während des "matching" - Prozesses durch die Fülle der Objektverbindungen die eigentliche Suchrichtung zu verlieren und damit ineffiziente Suchoperationen hervorzurufen. Ebenso sind falsche Schlußfolgerungen denkbar, wenn Objekten Eigenschaften zugeordnet werden, die für diese nicht gelten. So ist zum Beispiel

folgender falscher Schluß denkbar: bekannt ist, daß der Vogel Strauß Flügel hat und Eier leg daraufhin schließt das System die Zugehörigkeit des Vogel Strauß zur Klasse der Vögel, e korrekter Schluß. Die Zugehörigkeit zur Klasse der Vögel impliziert jedoch - dies wäre ei weitere gültige Inferenz - die Fähigkeit zu fliegen: ein Strauß könnte also gemäß den Inf renzprozeduren der Netzwerkstruktur fliegen, was aber bekanntermaßen falsch ist. Gleichermaß kann in einer komplexen Verkettung einem Objekt einer Klasse eine Eigenschaft zugewiesen werde die lediglich für eine besondere Ausprägung dieser Objektklasse gilt, nicht jedoch für d spezielle Objekt, da eine Differenzierung zwischen Objektklassen und Individuen bislang m schwer in Netzwerken zu implementieren ist.

Infolgedessen bezeichnet Rich(98) die Differenzierung zwischen einem Begriff ("concept") u seinen Spezifikationen ("instances of concept") als eine notwendige Voraussetzung. Spezifis markierte Verknüpfungslinien der Begriffsknoten müßten demnach allgemein zutreffende Eige schaften aufzeigen, während die speziellen Ausprägungen untergeordneter Individualinstanz durch besondere Verbindungen gekennzeichnet werden sollten. (Rich schlägt hier die Einführu einer neuen Verknüpfung vor: "INSTANCE-OF"); (99).

Ebenso ist die prinzipielle Unterscheidung zwischen allgemein akzeptierten Begriffsausprägung (Mittelwert, Normwert), z.B. prototypischen Merkmalen einer Objektklasse, und der Summati aller Spezifikationen eines Begriffs von Bedeutung, wie man auch eine grundlegende Differe zierung zwischen Verbindungen vornehmen sollte, die neue Entitäten schaffen gegenüber jenen, d lediglich Relationen zwischen vorhandenen Konzepten determinieren.

Die Bedeutung, die den semantischen Netzwerken bei der Repräsentation von Wissen in Compute systemen zukommt, wird deutlich in der Einschätzung von Barr und Feigenbaum (100), die die Repräsentationsstruktur zu den populärsten Wissensrepräsentationsformen in der KI-Forschun zählen. Viele KI-Forscher begründen ähnliche Ansichten damit, daß die semantischen Netzwerk einerseits an die Grundlagen der Formalen Logik anknüpfen (interne prädikatenlogische Formal sierung) und andererseits am ehesten dazu in der Lage seien, die Besonderheiten der assoziative Verknüpfungen im menschlichen Gedächnis abzubilden . So wird das Netzwerkmodell besonders häuf in der maschinellen Sprachverarbeitung und bei der Konzeption von sprachver- stehenden Progra men angewandt, wobei die Möglichkeit zur Aggregation von Daten in diesem Zusammenhang a besonderer Vorteil dieses Repräsentationsschemas betrachtet wird. Probleme bei der Entwicklu wissensbasierter Systeme auf der Grundlage semantischer Netzwerke ergeben sich vor allem bei d Entwicklung großer Wissensbasen, die eine effektive Suche in Netzwerkstrukturen erschweren.

Darüberhinaus drängen sich einige grundsätzliche Fragen auf, die sich auch aus dem Anspru ergeben, man könne mit Netzwerkmodellen das menschliche Gedächtnis adäquat abbilden(101):

- Welche Form von Wissen wird durch einen Knoten repräsentiert?
- Existieren Möglichkeiten für die Repräsentation von Ideen in Netzwerkmodellen?
- können Zeitabläufe dargestellt werden?
- lassen sich abstrakte Termini, die keinen konkreten Sachbezug zur Realität aufweisen, formalisieren?

Diese bislang ungelösten Probleme, die sich möglicherweise als grundsätzliche Defizite v Computerwissensbasen erweisen, offenbaren, daß sich, trotz einiger Erfolge, auch mit Hilfe v Netzwerkmodellen nur bedingt eine Transformation menschlichen Wissens in Computerprogram realisieren läßt. Dabei implizieren diese Strukturen besondere Schwierigkeiten, die aus de Bemühen resultieren, die semantische Komponente in Wissensbasen zu integrieren. Die formali sierte Darstellung von Bedeutung beinhaltet grundsätzliche Probleme, auf die im späteren Tei der Arbeit noch eingegangen wird.

Gegenüber anderen Repräsentationsstrukturen zeigen semantische Netzwerke Vor- und Nachteile. S existiert im Gegensatz zur Aussagen- und Prädikatenlogik in den semantischen Netzwerken kein formale Syntax, die Schlußfolgerungsmöglichkeiten und deren Gültigkeit festlegt; in den Netz werken beruhen die Inferenzstrategien einzig auf systemspezifisch determinierten Prozeduren, di keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben können, da sie höchst unterschiedlich festgeleg werden und somit die Gefahr falscher Schlüsse in sich bergen. Die für die formallogische Repräsentationsstrukturen zutreffenden Kriterien der Vollständigkeit, Gültigkeit der Inferenze und Regelhaftigkeit der Ableitungsmöglichkeiten werden zwar als unbestreitbare Vorteile eine formallogischen Wissensdarstellung anerkannt, doch heben die Befürworter von Netzwerkstrukture die Vorteile einer semantischen Orientierung hervor in Gegenüberstellung zur ausschließlic

syntaktisch konfigurierten Formallogik. Damit seien eher problemfeldspezifische Inferenzstrategien möglich, so daß ineffiziente Suchprozesse vermieden werden könnten.

Die Berücksichtigung problemspezifischer Aspekte und das Bemühen um eine Integration semantischer Informationen erwies sich in der Praxis oftmals als effizienterer Weg als die bloß syntaktische Orientierung an formalen Gütekriterien, die für die Abbildung menschlichen Wissens von geringem Belang sind. Dennoch muß der Anspruch, man könne mit Netzwerkmodellen das menschliche Gedächtnis, zumindest das semantische Gedächtnis, abbilden, mit Vorsicht betrachtet werden, stellt sich doch die Komplexität und die divergente Verwobenheit der Informationen im menschlichen Gedächtnis als mit statischen Modellen kaum erfaßbar dar. Vermeidet man jedoch derartige Vergleiche und orientiert sich an der Konzeption effizienter Wissensbasen statt am überhöhten Anspruch der Nachbildung des menschlichen Gedächtnisses, darf man wohl die semantischen Netzwerke trotz der oben aufgeführten Nachteile zu den wichtigsten Strukturen zur Repräsentation von Wissen in Computern zählen.

2.4 Frames

2.4.1 Allgemeine Grundlagen

Eine Dimension menschlichen Wissens, die als wesentlich erachtet werden muß für die Art, Wissen in neuen, unbekannten Situationen einsetzen, ist das Erfahrungswissen. Es kann wohl als erwiesen gelten, daß Menschen über ein großes Arsenal wohlorganisierten Wissens verfügen, auf das sie in unterschiedlichen Situationen zurückgreifen. Auf der Grundlage von Erwartungen können Phänomene und Ereignisse eingeordnet und adäquate Handlungen vollzogen werden. Erwartungen basieren auf der Fülle von Erfahrungen, wie sie jeder Mensch tagtäglich erwirbt; sie sind das Fundament wissenden Umgangs mit der Welt und dienen als Grundlage für Verständnis und die Bewältigung von bekannten und unbekannten Situationen. Diese für den Menschen typische Form, sich in seiner Umwelt zurecht zu finden, bildet die Basis des menschlichen Alltagswissens. "Representing knowledge about the objects and events typical to specific situations has been the focus of the AI-knowledge-representation ideas called frames and scripts" (103).

Die Idee zur Konzeption von Strukturen, mit denen das menschliche Erwartungswissen in Computerwissensbasen repräsentiert werden kann, geht auf Minsky zurück, der mit eben dieser Zielsetzung im Jahre 1975 die sogenannten Frames entwickelte. Obwohl seither verschiedene Interpretationen mit dem Begriff "Frame" assoziiert wurden, läßt sich folgende Definition noch als allgemeingültig anführen: "Ein Frame ist ein strukturiertes und begrenztes Paket oder Bündel von Informationseinheiten, das die Kenntnis einer im alltäglichen Leben häufig anzutreffenden stereotypen Situation oder eines solchen Objekts repräsentiert" (104). Die menschliche Fähigkeit, sich im Alltag zu orientieren, beruht auf der Möglichkeit, eine aktuelle Situation mit den eigenen Erfahrungen zu vergleichen. Man nimmt an, daß Ähnlichkeiten von bekannten und neuen Situationen die Voraussetzung dafür sind, daß Objekte oder Szenen erkannt und eingeordnet werden können(105).
Diese Besonderheit des menschlichen Umgangs mit der Welt wurde bei der Konzeption von Frames berücksichtigt. Die generelle Struktur wird als "slot-and-filler representation structures" charakterisiert(106). Ein Frame stellt eine Objektkategorie oder einen Begriff dar, denen durch eine bestimmte Anzahl von sogenannten "slots" objektspezifische Merkmale zugewiesen sind. Die Objektkategorie oder der spezifische Begriff werden durch eine bestimmte Bezeichnung klassifiziert; die Ausprägungen der Kategorie sind durch die slots (auch terminals genannt) spezifiziert. Damit bilden Frames eine rahmenähnliche Struktur, die verschiedene Merkmalsausprägungen von Objekten, Objektklassen und Situationen beinhaltet.

2.4.2 Die Struktur eines Frames

Ein Frame kann sowohl den globalen Erwartungsrahmen für ein Phänomen darstellen als auch eine konkrete Instanz repräsentieren, d.h. den spezifischen Ausprägungsgrad eines Objektes einer Klasse vertreten(107). Zur Illustration der Struktur eines Frames diene folgendes Beispiel der stereotypen Repräsentation einer Kindergeburtstagsparty:

```
Dress.....sunday-best
present.....must please host
            must be bought and gift-wrapped
games.....hide and seek. pin tail on donkey
decor.....balloons.favors.crepe-paper.
```

party-meal.....cake.ice-cream.soda.hot dogs.
cake.....candles.blow-out.wish.sing birthday song.
ice-cream.....standard three-flavor. (108)

Die einzelnen Slots können sowohl Listen von Erwartungswerten beinhalten, z.B. Art des Zimmers (Wohnzimmer, Schlafzimmer, Eßzimmer, Küche...) als auch Standardeinträge aufweisen, sogenannte "default-slots" (109). Diese "default" - Einträge werden insbesondere in solchen slots verwendet, die im allgemeinen eine Standardeintragung zulassen; dabei gelten die Standardisierungen solange, bis ein expliziter Widerspruch auftritt oder ein Neueintrag erfolgt. Normalausprägungen von Objekten oder Objektklassen werden so repräsentiert, ohne daß ständig neue Slotbesetzungen vorgenommen werden müssen; z.B. beinhaltet das Frame "Haus" einen slot "Tür" mit dem Wert mindestens 1 Tür vorhanden, wobei es sich dabei um einen default value handelt. Man trägt damit der Tatsache Rechnung, daß nahezu jedes Haus eine Tür besitzt, d.h. dieser Slot mit einem Default-Wert besetzt werden kann, da es sich um ein stereotypes Merkmal handelt. Die "default assignements" (110) spiegeln in besonderem Maße Erwartungswerte wieder, die als typisch für eine bestimmte Situation oder ein Objekt gelten. Da sie auch als Variable (jederzeit durch Aktualwerte austauschbar), statistische Mittelwerte oder empirisch ermittelte Normen betrachtet werden können, wird durch ihre Anwendung die Verankerung logischer Quantoren in Frames überflüssig.

Eine besonders hervorzuhebende Eigenart von Frames ist die Möglichkeit der Verkoppelung deklarativen Wissens mit pro- zeduralen Strukturen. So können "slots" auch mit Prozeduren, "attached procedures", besetzt werden(111). Mit Hilfe dieser angekoppelten Prozeduren ist z.B. der Aufruf eines neuen Frames oder die Neubesetzung eines Slots möglich (112). Prinzipiell unterscheidet man zwei unterschiedliche Formen von Prozeduren: die sogenannten "demons"(113) oder "Dämonen" sowie die "servants"(114) (Die hier vorgenommene Differenzierung der Prozeduren wird insbesondere in den später noch beschriebenen Programmiersprachenentwicklungen FRL und KRL, die speziell der vereinfachten Wissensrepräsentation dienen, angewandt). Diese Prozeduren legen die Bedingungen fest, wann neue Frames aufgerufen werden sollen, wann eine rückwärtige Suche nach Ersatzframes bei falscher Auswahl eines Frames stattfinden muß, wann slots neu besetzt werden bzw. zusätzliche Informationen vom Benutzer erfragt werden müssen. So dienen diese Prozeduren der Kontrollsteuerung der Framebenutzung ebenso wie der Vermeidung einer Selektion probleminadäquater Frames.

Unter die Kategorie der sogenannten "demons" lassen sich die Prozeduren "If-added"(115) und "If-removed" fassen. Die "If-added-procedure"(116) tritt genau dann in Kraft, wenn der Slot, an den diese Prozedur gekoppelt ist, besetzt wird, während die "If-removed-procedure" dann die Neubesetzung eines Slots oder die Instantiierung oder Elimination abhängiger Frames festlegt, wenn der Wert des jeweiligen Slots gelöscht wird.

Zur Illustration der "If-removed-prozedur" diene folgendes Beispiel: Man nehme an, der Slot, an den die Prozedur gekoppelt ist, determiniere den Besitz eines Autos. Im Falle des Prozedurauf- rufs hätten die externen Daten den Verlust des Autos ergeben, d.h. die Bedingung daß der Slot gelöscht ist, sei erfüllt. Nun könnte z.B. die If-Removed-Prozedur die vom Besitz eines Autos abhängigen Frames "Tanken", "Autobahnfahrt" und "Autowaschen" intern als problemirrelevant markieren, um die Selektion potentiell adäquater Frames einzuschränken und stattdessen nun relevant gewordene Frames wie "Eisenbahnfahrt", "Zu-Fuß-gehen" etc. aufzurufen. Hier wird deutlich, daß durch die Verwendung von "demons" eine problemspezifische Auswahl der Frames unter zuvor determinierten Bedingungen erleichtert wird. Man nimmt innerhalb der KI-Forschung an, daß mit Hilfe von Prozeduren die menschliche Fähigkeit simuliert werden kann, die Konsequenzen neu gewonnener Informationen unmittelbar in die Interpretation von Ereignissen zu integrieren, wie es etwa bei obigem Beispiel deutlich wurde.

Zu den sogenannten "servants" zählen folgende Prozeduren: die "If-needed-procedure"(117) sowie die "to-establish- procedure" (119). Diese Prozeduren zielen darauf, daß bestimmte Operationen auf jeweils bestimmte Daten angewandt werden. Diese Vorgehensweise impliziert den Aufruf neuer Frames, die als potentiell relevant für die Instantiierung des betroffenen "slot" gelten, direkte Benutzung von Funktionen und die Ausgabe von Fragen an den Benutzer zur zusätzlichen Informationsgewinnung. Die "To-establish-procedure" ermöglicht die Bildung einer neuen Prozedur anhand der bekannten Daten. Die der Kontrollsteuerung von Frameauswahl und Slotbesetzung dienenden "attached-procedures" vereinfachen insgesamt die Selektion von Frames und erleichtern den Zugriff auf die Datenbasis und die Modifikation nicht adäquater Besetzungen.

In den Wissensrepräsentationssprachen FRL und KRL wird eine weitere Differenzierung vorgenommen,

die nicht nur die Bedingungen festlegt, wann eine Prozedur aufgerufen wird, sondern darüberhinaus noch bestimmt, welchen Datentyp sie betrifft. So unterscheidet man hier zwischen "traps", das sind Prozeduren, die mit einem Datenobjekt assoziiert sind, und "triggers", Prozeduren, die mit Objektklassen verbunden werden. Durch diese Unterscheidung wird, als Erweiterung der später noch detaillierter beschriebenen Schlußfolgerungsmöglichkeiten in Frames, eine sogenannte "procedural inheritance", d.h. die Vererbung der objekt- oder klassenspezifischen Prozedurankopplungen, ermöglicht (120).

Da die Neuentwicklung und Instantiierung von Frames eine sehr langwierige und oft mühselige Arbeit bedeutet, ent- wickelte man verschiedene Konzepte für Programmiersprachen, die speziell auf die Erfordernisse der Wissensrepräsentation zugeschnitten sind. Diese Sprachen bzw. Programmpakete erleichtern durch ihre Struktur die Verankerung von Wissen in einer frame-artigen Form. Zu diesen Entwicklungen zählen:

- die bereits oben erwähnten Sprachen KRL ("Knowledge Representation Language") (Bobrow und Winograd 1977) und FRL-0 (Goldstein und Roberts 1977),
- das Programmpaket UNITS (Stefik 1980),
- die scripts, Weiterentwicklungen von Schank und Abelson (1977), die später noch ausführlicher dargestellt werden,
- die Sprache OBJTALK (Institut für Informatik, Stuttgart 1979).

2.4.3 Vernetzung von Frames

Bereits im Abschnitt über die semantischen Netzwerke wurde deutlich gemacht, wie entscheidend die Verknüpfung von Wissensstrukturen für die Bildung einer effizienten Wissensbasis ist. Diesen Erfordernissen wird auch in framebasierten Wissensbänken Rechnung getragen. So ist der Zusammenschluß einzelner Frames in Frame-Systemen zur Repräsentation von Begriffen, Situationen oder Handlungsabläufen ebenso möglich wie die direkte Verknüpfung einzelner Frames durch die gemeinsame Besetzung einzelner Terminals ("terminal sharing"), (121). Die Zusammenfügung verschiedener Frames zur Charakterisierung komplexer Phänomene wird realisiert, indem einem slot oder Terminalfeld ein "subframe" (122) zugeordnet wird. So lassen sich z.B. Unterkategorien einer Objektklasse oder spezifische Ausprägungen von Individualinstanzen determinieren und Vererbungen von Eigenschaften auf der Basis dieser Strukturierung vereinfachen. Die gemeinsame Terminalbesetzung von Frames bedingt nicht nur eine ökonomische Reduktion der Datenmenge in einer Wissensbasis, sondern ermöglicht darüberhinaus die Darstellung unterschiedlicher Sichtweisen derselben Situation oder des gleichen Objekts. "Since each slot of a frame can be filled by another frame structure and since a given structure can fill more than one slot, there need be no redundant storage of the information that is common to many views"(123).

Die gemeinsame Benutzung eines Terminalfeldes durch unter- schiedliche Frames vereinfacht auch die Repräsentation von Ereignisabläufen, bei denen sich nur die Werte einzelner "slots" ändern. Durch die Verknüpfung von Frames, die jeweils unterschiedliche Stadien einer Aktion unter Beibehaltung der Rahmenbedingungen darstellen, glaubt man, sequentielle Abläufe repräsentieren zu können; "the difference between the frames of a system can represent actions, cause-effect relations, or changes in conceptual viewpoint" (124). Es wird deutlich, daß Prozesse als Abfolge diskreter Zustandsänderungen begriffen werden, wie dies schon bei entsprechenden formallogischen Repraesentationen zu beobachten war.
Aggregate von Frames, "Szenarios", gelten innerhalb der KI-Forschung als Möglichkeit für die Verankerung sehr komplexer Sachverhalte in Computerwissensbasen, wie man auch generell von der Annahme ausgeht, daß Frames eine adäquate Struktur zur Abbildung von Alltagswissen sind.

2.4.4 Schlußfolgerungen in frame-basierten Systemen

Zu den Schlußfolgerungsmöglichkeiten in framebasierenden Wissenssystemen zählen zunächst die bereits oben kurz erwähnten Vererbungsmöglichkeiten: die "property inheritance" und die "procedural inheritance" (125). Mithilfe dieser Inferenzen ist die direkte Übertragung von Eigenschaften, die für eine Objektklasse als typisch verankert wurden, zu jedem Individualobjekt derselbigen Klasse realisierbar, ohne daß diese Eigenschaft explizit dem jeweiligen Objekt zugewiesen werden muß (siehe hierzu auch den Abschnitt über semantische Netzwerke). Ebenso kann über den Mechanismus der "procedural inheritance" eine Prozedur, die an ein individual- oder klassenspezifisches Terminalfeld gekoppelt ist, auf andere Instanzen der betroffenen Klasse übertragen werden, soweit nicht widersprüchliche Informationen dies verbieten. Diese Vererbungstechniken, die eine hierarchische Strukturierung der Frames dokumentieren, sind auch bei der Selektion problemadäquater Frames richtungsweisend. Die Suche kann entweder vorwärts gerichtet

ablaufen ("forward reasoning") oder rückwärts gerichtet sein ("backward reasoning" (127)). Di Prozeduren "If-added" und "If-removed" sind eher datenorientiert, d.h. bewirken eine Vorwärts- verkettung, während die "If-needed-procedure" rückwartige, d.h. zielorientierte Suchprozesse triggert. Die vorwärtsorientierte Suche impliziert eine Überprüfung hierarchisch übergeordneter generellerer Frames, während die rückwartigen Suchprozesse immer spezifischere Ausprägungsgrade der Objektklassen untersuchen.

Die Vererbung von Eigenschaften und Prozeduren ist in Framesystemen gut realisierbar; größere Probleme stellen sich dem Benutzer vor allem bei der Selektion passender Frames, insbesondere bei der Suche nach Ersatzframes, wenn sich das primär ausgewählte Frame als falsch erweist. Hierzu dienen die sogenannten "information-retrieval-net- works". Das Prinzip dieser Suche liegt in der Überprüfung von Ersatzframes, die in möglichst vielen Terminalfeldern mit dem Ursprungs- frame übereinstimmen; auch hier dient die hierarchische Struktur als richtungsweisend infolge der Terminalüberschneidungen.

Grundsätzlich erfolgt die Auswahl eines passenden Frames durch den Vergleich der externen Daten mit den Terminalbesetzungen der gespeicherten Frames. Nimmt man als Beispiel ein Programm zur Textanalyse, so werden zunächst die im Text vorkommenden Woerter mit den Kennzeichnungen der Frames und ihren Slotspezifikationen verglichen. Dieser als "pattern- matching" (128) bezeich- nete Prozeß ermöglicht auch deduktive Schlußfolgerungen während des Merkmal-Vergleichs. So können Inferenzen vorgenommen werden, die Eigenschaftszuweisungen der hierarchisch über- oder untergeordneten Frames im Matching-Prozeß auch dann berücksichtigen, wenn diese im selektierten Frame gar nicht explizit verankert sind; d.h., bei einem Vergleich der externen Daten mit einem spezifischen Frame werden objektklassenspezifische Slotbesetzungen in das Matching integriert.

Im Verlauf der Entwicklung wurden die Matching-Prozeduren differenzierter; das "bewertende Matching" (129) wählt die Anzahl der jeweils übereinstimmenden Wörter bzw. Slotbesetungen als Vergleichsmaßstab zur Selektion eines adäquaten Frames; Beim "gewichteten Matching"(130) werden zudem die einzelnen Vergleiche gewichtet, um so der Auffassung Rechnung zu tragen, nach der manche Merkmalsausprägungen charakteristischer für eine Objektklasse sind als andere.

2.4.5 Einschätzung

Die Auswahl der jeweils passenden Frames stellt eines der größten Probleme in Frame-Systemen dar; Charniak (131) nennt hier insbesondere drei Momente:
- die Auswahl eines Frames, wenn mehrere passend scheinen;
- die Selektion, wenn keine Key-Wörter in den externen Daten enthalten sind, die auf passende Frames weisen;
- die Korrektur bei falscher Frameauswahl.

Charniak will mithilfe einer Durchschnittbildung, d.h. einer Auswahl der jeweils höchsten Zahl an Überschneidungen im Matching-Prozeß, diese Probleme bewältigen und nähert sich mit diesem Vorschlag den oben genannten Erweiterungen von Matching-Prozeduren an.

Weitere Schlußfolgerungsmöglichkeiten sind in der Entwicklung begriffen; sie sind jedoch eher an konkrete Programmsysteme gebunden, als daß sie sich als verbindliche Inferenzmechanismen von framebasierten Systemen darstellen ließen.

Frames stellen in vielfacher Hinsicht nützliche Wissensstrukturen dar. Sie greifen Teilaspekte einer wichtigen Form des menschlichen Umgangs mit neuen Situationen auf: den Vergleich von Merkmalen unbekannter Objekte mit schon Bekanntem als Basis für das Verständnis von Phänomenen. Minsky (132) bezog sich bei der Entwicklung von Frames auf das Husserl'sche Konzept des "inneren Horizonts", nach dem mit jedem Phänomen ad hoc eine auf Erfahrung basierende Fülle von Erwar- tungen gekoppelt wird, die dann zur Einordnung des zunächst unbekannten Objekts führen. In einem späteren Teil der Arbeit werden die Grenzen einer solchen Vorstellung deutlich zu Tage treten. Frames stellen Stereotype von Objekten, Situationen und Handlungen dar; dies bedingt ihre Stärke, offenbart jedoch auch ihre Schwäche in Situationen, in denen Ereignissequenzen oder Objektspezifikationen vom Stereotyp abweichen. In der Rückbesinnung auf die Alltagswelt, die eine Fülle von Abweichungen gegenüber dem Standard und der Norm aufweist, können die Frames in keiner Weise dem Anspruch gerecht werden, die reale Welt in all ihrer Komplexität auch nur annäherungsweise abzubilden. Diese grundsätzlichen Probleme werden ergänzt durch computertech- nische Schwierigkeiten bei der Konzeption von framebasierten Systemen. Falsche Schlußfol- gerungen, Probleme bei der Auswahl von Frames, ineffiziente Suchalgorithmen, semantische

Ambiguität und weiteres mehr stellen nur einen Teilbereich der Hindernisse dar, die sich dem Konstrukteur von Framesystemen gegenüberstellen. Dennoch können die Frames als effiziente Wissensrepräsentationsstrukturen gelten im Rahmen der Möglichkeiten einer Transformation von menschlichem Wissen auf Computer.

2.5 Scripts

2.5.1 Allgemeine Bemerkungen

Eine Weiterentwicklung des ursprünglichen Framekonzepts sind die sogenannten "scripts", die 1977 von Schank und Abelson (133) eingeführt wurden. Ähnlich wie Frames dienen Scripts einer schematisierten Darstellung von Wissen, wie sie als bedeutsam erachtet wird für die Implementation von Alltagswissen in Computerwissensbasen. Das zugrundeliegende Prinzip des Script-Konzepts ist demnach die Repräsentation stereotyper Situationsabfolgen: "A script is a structure that describes a stereotyped sequence of events in a particular context" (134).

Der Unterschied zwischen Frames und Scripts ist kein qualitativer; er besteht lediglich in einer eingeschränkteren inhaltlichen Anwendung. So dienen scripts insbesondere der Darstellung von zeitlich oder kausal miteinander verknüpften Ereignissequenzen.

2.5.2 Der Aufbau eines Scripts

Die Struktur der Scripts gleicht somit, global gesehen, dem Aufbau von Frames; auch scripts enthalten eine bestimmte Anzahl von Slots, die mit situationsspezifischen Werten besetzt werden müssen. Dabei können ebenso "Default"-Werte in die slots integriert werden, die Standardwerten oder wahrscheinlichen Ausprägungen von Situationen entsprechen. Zu den elementaren Kategorien eines Scripts zählen Folgende:

- die Eingangsbedingungen: sie bestimmen die Voraussetzungen für die Benutzung eines Scripts;
- das Ergebnis: es determiniert die Fakten, die nach Ablauf der Ereignisfolge eines Scripts zutreffen;
- die "Props": konstante Objekte, deren Existenz bei Aufruf eines Script angenommen werden kann, auch wenn die einzelnen Objekte nicht explizit erwähnt werden;
- die Rollen: Personen, die üblicherweise in der script-spezifischen Situation auftreten; ihre Existenz kann ebenso ohne explizite Verankerung vorausgesetzt werden;
- die "tracks": verschiedene Variationen genereller scripts, d.h. differenzierte Ausprägungen einer bestimmten Situation; diese Tracks teilen viele, jedoch nicht alle slots (135);
- die Szenen: situationstypische Ereignisabläufe, die in den Termini der "conceptual dependency primitives", also durch eine Gruppe semantischer Primitiv-Ausdrücke, ausgedrückt werden (136).

Die in den Scripts verankerten Ereignisabläufe bilden eine Kette kausal und häufig auch zeitlich voneinander abhängiger Situations- sequenzen, wobei die Eingangsbedingungen den Anfang und die Resultate das Ende dieser Kette bilden. Die Ergebnisse enthalten sowohl bestimmte Implikationen, die sich aus der Benutzung eines Scripts ergeben (etwa die Tatsache, daß eine Person, die im Restaurant war, keinen Hunger mehr hat) als auch Hinweise auf nachfolgend zu benutzende Scripts (etwa nach dem Restaurant-Besuch das Script "Einladung zu einem Kaffee") und ermöglichen so eine Steuerung des Scriptaufrufs.

Der Illustration diene das bekannte Restaurant-Script von Schank und Abelson (137), mit dem der stereotype Handlungsablauf eines Restaurantsbesuches repräsentiert wird. Das Script wird durch Angaben eingeleitet, die Informationen über die an der Handlung beteiligten Objekte und Personen, die Eingangsbedingungen und Resultate beinhalten; der Hauptteil des Scripts besteht aus vier Szenen, die den Restaurantbesuch in vier Stadien aufteilen.

Folgende Aktionsbezeichnungen sind für das Verständnis des nachfolgenden Beispiels wichtig:

" PTRANS change the location of a physical object
ATRANS change an abstract relationship
ATTEND direct a sense organ toward a stimulus
MTRANS transfer information
MBUILD construct new information from old information
MOVE move a body part
INGEST take something to the inside of an animate object "(138).

```
"Script: RESTAURANT

 Track: Coffee Shop
 Props: Tables
        Menu
        F-Food
        Check
        Money
 Roles: S-Customer
        W-Waiter
        C-Cook
        M-Cashier
        O-Owner
 Entry conditions: S is hungry
                   S has money
 Results: S has less money
          O has more money
          S is not hungry
          S is pleased (optional)

 Scene1: Entering

 S PTRANS S into restaurant
 S ATTEND eyes to table
 S MBUILD where to sit
 S PTRANS S to table
 S MOVE  S to sitting position
Scene2: Ordering

 (menu on table)   (W brings menu)   (S ask for menu)
 S PTRANS menu to S                  S MTRANS signal to W
                                     W PTRANS W to table
                                     S MTRANS 'need menu'
                                              to W
                                     W PTRANS W to menu
                   W PTRANS W to table
                   W ATRANS menu to S

             S MTRANS food list to CP (S)
             S MBUILD choice of F
             S MTRANS signal to W
             W PTRANS W to table
             S MTRANS 'I want F' to W
                   W PTRANS W to C
                   W MTRANS (ATRANSF) to C

C MTRANS 'no F' to W                 C DO (prepare F
W PTRANS W to S                             script)
W MTRANS 'no F' to S                 to Scene 3
(go back to *) or
(go to Scene4 at no pay path)

Scene3: Eating

C ATRANS F to W
W ATRANS F to S
S INGEST F
(Optionally return to Scene2 to order more;
otherwise go to Scene4)

Scene4: Exiting
                                     S MTRANS to W
                                     (W ATRANS check to S)
```

W MOVE (write check)
W PTRANS W to S
W ATRANS check to S
S ATRANS tip to W
S PTRANS S to M
S ATRANS money to M
to pay path) S PTRANS S to out of restaurant" (139).

e hier verankerten "conceptual dependecy primitives" (140), basieren auf einem Konzept von ank, das darauf zielt, die ganze Fülle menschlicher Handlungsmöglichkeiten durch elf (!) ndamentalverben zu ersetzen. Außer den oben angeführten (PTRANS, ATRANS etc.) sind dies noch:

PROPEL apply a force to a physical object
EXPEL force something out from inside an animate object
GRASP grasp an object physically
SPEAK produce a sound" (141)

f diese Primitivstrukturen soll jedoch hier nicht näher eingegangen werden, wenn auch die nahme, das Spektrum menschlicher Handlungen ließe sich durch ein Set von Primitiv-Vokabeln sdrücken, typisch erscheint für die Simplifizierung der Welt innerhalb der KI-Forschung.

r Überprüfung der Anwendbarkeit von Scripts in "textverstehenden" Programmen, entwickelte hank das Programmsystem SAM ("Script Applier Mechanism")(142). SAM ermöglicht auf der Basis r Restaurant-Scripts die Paraphrasierung eines Kurztextes über Restaurantbesuche und die sammenfassung von ausführlichen Beschreibungen über Restaurantbesuche. Mehrdeutige Wörter nnen so durch den Kontextbezug auf ihre situationsgebundene Bedeutung eingegrenzt werden. sätzlich werden auf der Basis der Verknüpfung einzelner Sequenzen im Script Fragen zu zeit-chen Ereignisabfolgen und Kausalverknüpfungen beantwortet.

5.3 Schlußfolgerungsmöglichkeiten mit Scripts

as primäre Problem bei der Anwendung von Scripts liegt in der Selektion einer situationsad-quaten Struktur. Dabei dient die Überprüfung der Eingangsbedingungen eines Scripts, d.h. der rgleich dieser Voraussetzungen mit den externen Daten, als Basis für die Auswahl eines assenden Scripts. Die sogenannten "script-headers" (143) werden mit der gegenwärtigen Situation rglichen, wobei die Regel gilt, daß mindestens zwei der "script-headers", (Rollen, Objekte "props"), Vorbedingungen, Ort oder Zeit) mit den externen Daten übereinstimmen sollen, um das eweilige Script als problemadäquates Schema auswählen zu können. Dieser primären Wahl folgt ann die detailliertere Überprüfung des jeweiligen Scripts, indem die aktuellen Daten (betei-igte Personen, Objekte, Situationsabfolgen) mit den Slotbesetzungen des selektierten Scripts rglichen werden. Konnte ein passendes Script gefunden werden, dient dieses nun als Grundlage öglicher Schlußfolgerungen.

ie Schlußfolgerungsmöglichkeiten, die sich bei der Anwendung von Scripts ergeben, beziehen sich or allem auf zwei Bereiche:
. die Vorhersage von Ereignissen, die nicht explizit beschrieben sind(144).
. die Fähigkeit, die Relation von Ereignisses zueinander erklären zu können, d.h. kausale Beziehungen als solche darzustellen.

ine der wichtigsten Fähigkeiten besteht also darin, unvollständige Situationsbeschreibungen rgänzen zu können. Deuteten die bekannten Fakten eines eingegebenen Textes auf die Adäquatheit eines Scripts, so kann durch die Slotbesetzungen und Speicherung der Ereignisabfolgen jede Information, die in diesem Script enthalten ist, auf den Text übertragen werden, d.h. dieser um die fehlenden Fakten ergänzt werden. Zur Illustration diene folgendes Beispiel:

Eingegebener Text:
'John went out to a restaurant last night. He ordered steak. When he paid for it, he noticed that he was running out of money. He hurried home since it had started to rain"(145).
Auf die Frage: "Did John eat dinner last night?" kann der Computer infolge seiner Scriptkenntnisse über den stereotypen Ablauf eines Restaurantbesuches mit "ja" antworten, obwohl die Tatsache, daß John am Abend ein Dinner aß, im Text nicht explizit erwähnt ist.
Da das Programm jedoch auf der Basis des entsprechenden Scripts ableiten kann, daß ein Restaurantbesuch, besonders der Vorgang des Bezahlens, die Einnahme einer Mahlzeit impliziert, kann es die unvollständige Information des Textes mit diesem Wissen ergänzen.

Eine weitere Möglichkeit der Schlußfolgerung mithilfe von Scripts ist die Begründung von Aktionen. Durch die kausalkettenartige Verknüpfung der Einzelereignisse in Scripts verfügt das Programm über Wissen, "how events are related to each other"(146). Durch sogenanntes "backward-reasoning"(147), d.h. rückwartige Verfolgung der Ereignisabfolgen, können die Gründe für Aktionen evaluiert werden; durch Vorwärtsverkettung ist die Voraussage nachfolgender Aktionen sowie die Explikation ihrer Abhängigkeit von vorherigen Handlungen möglich. Die Beziehung aufeinanderfolgender Ereignisse wird hier als Relation von Ursache und Wirkung begriffen, wie in folgendem Beispiel deutlich wird:

Text: "John went out to lunch. He sat down at a table and called the waitress. The waitress brought him a menu and he ordered a hamburger"(148).

Auf die Frage: "Why did the waitress bring John a menu?" kann das Programm antworten:

"Because John asked her to".

Hier wird deutlich, daß durch die kausale Verknüpfung der Handlungsabfolgen in Scripts Fragen nach Gründen für Handlungen korrekt beantwortet werden können, selbst wenn die Gründe im Ursprungstext nicht explizit erwähnt sind. Diese Schlußfolgerungen sind natürlich nur dann möglich, wenn der eingegebene Text einem implementierten Script entspricht; Abweichungen führen zu unsinnigen Antworten des Programms. Ebenso sind die Beziehungen aufeinanderfolgender Ereignisse nicht immer kausal, d.h., Fragen nach den Ursachen von Handlungen können bei rigider Anwendung des obengenannten Inferenzmechanismus völlig falsche Antworten hervorrufen. Um diese Fehler auszuschließen, bedürfte es eines semantischen Verständnisses der Scriptbedeutungen, über das die Programme jedoch nicht verfügen.

2.5.4 Einschaetzung

Insgesamt betrachtet wirft die Anwendung von Scripts bei der Repräsentation von Wissen ähnliche Probleme auf wie alle schematischen, auf stereotyper Darstellung basierenden Wissensformen. So stellt auch hier die Auswahl situationsadäquater Scripts ein großes Problem dar, da oft keine Anhaltspunkte im Text eruiert werden können, die auf ein bestimmtes Script hinweisen. Darüberhinaus werden häufig falsche Schlüsselwörter zur Selektion herangezogen, die für die Einordnung und das "Verstehen" eines Textes irrelevant sind. Ebenso entstehen große Schwierigkeiten bei nichtstereotypen Handlungsabläufen; d.h. weicht eine Handlungssequenz an einem relevanten Punkt von der stereotypisierten Abfolge ab, ist eine Paraphrasierung oder korrekte Beantwortung von Fragen nicht mehr fehlerlos möglich. So können Scripts nur dann als effiziente Wissensrepräsentationsstrukturen begriffen werden, wenn sie als Basis des Umgangs mit ausschließlich solchen Texte dienen, die rigide, stereotype Handlungsabläufe dokumentieren. Keinesfalls jedoch kann auch nur im Entferntesten der Anspruch erhoben werd mithilfe der Scripts sei das Verständnis der realen Welt durch Computer realisierbar, da keine Situation derartig standardisie im menschlichen Alltagsleben abläuft, wie es die Repräsentation durch Scripts vermittelt. Folgender Auffassung Rich's (149) kann also nur mit Vorbehalten Recht gegeben werden: Skripts "can be very effective for representing the specific kinds of knowledge for which they are designed". Demgegenüber ist die Einschätzung Wettlers (150) erheblich realistischer, nach der die Rigidität der Scriptstruktur ein wirkliches Verständnis kausaler Beziehungen zwischen Ereignisse nicht ermöglicht.

Deutlich wird bei der Repräsentation von Wissen durch Frames wie Scripts, daß man innerhalb der KI-Forschung von der Annahme ausgeht, menschliche Wahrnehmung und menschliches Verstehen basierten auf einem Merkmalsvergleich. So geht man davon aus, daß Menschen Objekte und Situationen zu erkennen vermögen, indem sie einzelne Attribute dieser Konfigurationen als Indikatoren für den Rückgriff auf analoge Erfahrungen einsetzen. Der isolierte Vergleich von Merkmalen einer aktuellen Situation mit einer entsprechenden, im Gedächtnis verankerten Erfahrung, soll durch die Konzepte der Frames und Scripts simuliert werden, um auf dieser Basis "verstehende" Programme zu entwickeln. Derartige Auffassungen stehen im Widerspruch zu Untersuchungsergebnissen, die auf eine Form strukturellen Erkennens bei Menschen hinweisen(152). Die Grenzen von Frames und Scripts liegen in der Stereotypisierung von Kontexten, die ein kontextüberschreitendes Erkennen von Phänomenen unmöglich macht. Infolgedessen sind diese Konzepte als nicht hinreichend zu begreifen, das komplexe Alltagswissen eines Menschen auch nur annäherungsweise abbilden zu können.

6 Produktionsregeln und Produktionssysteme

6.1 Allgemeine Grundlagen

e bislang dargestellten Formen zur Repräsentation von Wissen lassen sich insgesamt als klarative Strukturen bezeichnen, die vor allem auf die Verankerung statischen Wissens elen(153). Demgegenüber dienen die prozeduralen Strukturen der Repräsentation von sogenanntem ktiven" Wissen(154); sie ermöglichen die unmittelbare Integration von Schlußfolgerungen in die weilige Repräsentationsstruktur.
erschiedene Konzepte (155) wurden entwickelt, um prozedurales Wissen in Computerdatenbasen zu rankern. Hier soll lediglich auf die wichtigste dieser Strukturen eingegangen werden: auf die oduktionsregeln und -systeme.
oduktionsregeln zählen schon deshalb zu den am häufigsten benutzten Strukturen zur Repräsen-tion von Wissen, weil sie in Expertensystemen vorrangig Anwendung finden. Die Repräsentation on Aktions- und Handlungswissen - eben jenem Wissen also, daß in Expertensystemen implementiert erden soll - wird durch Produktionsregeln wesentlich erleichtert.

The term production system is used to describe several different systems based on one very eneral, underlying idea - the notion of condition-action pairs, called production rules, or ust productions"(156). Ein Produktionssystem stellt somit das Gesamtgefüge eines Programms dar, essen Wissensbasis durch Produktionsregeln konfiguriert ist, während der Begriff Produktions-egel die einzelne Wissenstruktur umschreibt, auf deren Grundlage die Datenbasis eines Produk-ionssystems konfiguriert wird Produktionssysteme wurden erstmals von dem Mathematiker Post 1943)(157) entwickelt, doch gewannen sie erst im Kontext der Entwicklung von Expertensystemen hre herausragende Bedeutung. Ähnlich wie bei vielen Konzepten der KI-Forschung ist eine indeutige Definition von Produktionssystemen schwierig angesichts der Variationsbreite unter-chiedlicher Implementations- bemühungen; dennoch lassen sich auch hier einige grundlegende haraktеristika dieser Repräsentationsstruktur aufzeigen. So bestehen Produktionsregeln üb-icherweise aus zwei Teilen: einem Bedingungs- und einem Aktionsteil, der "left hand side" und ler "right hand side" (158), die umgangssprachlich durch "If-Then"- bzw. "Wenn-Dann"-Verknüp-ungen gekennzeichnet sind. "Eine Produktionsregel ist ein Paar (Test)—(Aktion), wobei (Test) ls Prädikat über die Datenbasis, und (Aktion) als Anweisung zur Änderung der Datenbasis nterpretiert wird"(159). Anders ausgedrückt: wenn alle Bedingungen einer Produktionsregel rfüllt sind, d.h. die Daten mit den Bedingungen einer Regel übereinstimmen, kann die Regel "feuern", d.h. die im Aktionsteil enthaltene Anweisung kann ausgeführt werden. Winston(160) haraktеrisiert Produktionsregeln folgendermaßen: "A production is a rule consisting of a situation recognition part and an action part". In deduktiven Systemen, z.B. in Expertensys-temen, ist der Erkennungsteil der Regel zumeist eine Kombination mehrerer Fakten, während der Aktionsteil die aus den Bedingungen ableitbaren Schlußfolgerungen enthält; Winston(161) bezeich-net folgerichtig die Produktionsregeln auch als "premise- conclusion pairs".

Das folgende Beispiel ist dem Programm "Chicken Cacciatore" von Erman(162) entnommen:

```
"Rule 27
"English"version
This rule is tried in order to find out about the color of
wine for the meal.
        "IF
            1. The main component of the meal is known,
            2. The main component of the meal is not fish,
            3. The meal has a sauce on it, and
            4. The sauce on the meal is tomatoey
         THEN
            1. It is definite (1.0) that the color of wine
               for the meal is red."
```

Die Übersetzung in die AI-Programmiersprache LISP lautet wie folgt:

```
"PREMISE
        (AND  (KNOWN CNTXT MAIN-COMPONENT)
              (NOTSAME CNTXT
                       MAIN-COMPONENT FISH)
              (SAME CNTXT HAS-SAUCE)
              (SAME CNTXT SAUCE TOMATOEY))

 ACTION
        (CONCLUDE CNTXT COLOR RED TALLY 1000)"(163).
```

Produktionssysteme enthalten meistens eine große Anzahl dieser Produktionsregeln in ihren Wissensbasen. Sie sind in einer einheitlichen Struktur repräsentiert, wobei die einzelnen Sätzeeiner Regel, die "clauses", in Form sogenannter assoziativer Tripel, also in enger Anlehnung an die prädikatenlogische Formalisierung verankert werden.

Üblicherweise verfügen Produktionssysteme über einen Regelinterpreter zur Systemkontrolle, dem einerseits das "pattern-matching", der Vergleich von internen und externen Daten, obliegt und der andererseits die Selektion problemadäquater Regeln vornimmt und kontrolliert(164). Darüberhinaus besitzen viele Produktionssysteme eine zusätzliche Datenbasis, die als "context"(165) bzw. "data or short term memory buffer" bezeichnet wird und einen aktuellen Datenspeicher darstellt. Regelinterpreter und Kontextbuffer bilden die Grundlage dafür, daß die Bedingungen der Produktionsregeln mit den vorhandenen Daten verglichen und die Aktionen einer selektierten Regel ausgeführt werden können.

Produktionssysteme arbeiten in Zyklen, die sich in der Regel in drei Phasen teilen lassen:
1. "matching",
2. "conflict resolution",
3. "action" (166).

Die erste Phase, das sogenannte "matching" , beinhaltet die Überprüfung der Produktionsregeln durch den Interpreter. Dies erfolgt, indem die erfragten oder inferierten Daten eines aktuellen Falles im "context" verankert und mit den Prämissen spezifischer Produktionsregeln verglichen werden. Erst wenn der Konditionsteil einer Regel dem Inhalt des Kontextbuffer äquivalent ist, kann die jeweilige Regel ausgeführt werden, d.h. der Aktionsteil tritt in Kraft. Die Daten über den jeweiligen Fall sind in Form von Listen oder Sätzen im Kontextbuffer gespeichert. Sie werden jeweils dann ergänzt oder modifiziert, wenn der Aktionsteil einer Regel in Kraft tritt und bilden so die Vergleichsdaten für die Selektion und Überprüfung nachfolgender Regeln.

Die zweite Phase ("conflict resolution") tritt dann in Kraft, wenn die Bedingungen mehrerer Produktionsregeln mit den Daten eines speziellen Falles übereinstimmen, d.h. eine Selektion unter mehreren Regeln vorgenommen werden muß. Im Kontext der Entwicklung von verschiedenen Produktionssystemen wurden verschiedene Strategien entworfen, die darauf zielen, die jeweils passendste Regel zu finden(167).

Die dritte Phase, die "action"- oder Aktionsphase, beinhaltet das "Feuern" der Produktionsregel, d.h. die Ausführung des Aktionsteils derjenigen Regel, die als adäquat ausgewählt wurde. Die Ausführung des Schlußfolgerungsteils kann den Aufruf einer neuen Regel, Handlungsanweisungen an den externen Benutzer, faktenspezifische Schlußfolgerungen, die zur Änderung oder Ergänzung des dynamischen Datenspeichers führen oder Indikatoren für die weitere Problemlösung beinhalten.

Nach dem Durchlauf vieler solcher Zyklen, während derer der dynamische Datenspeicher stetig wächst, kann schließlich eine Lösung mit einem bestimmten Sicherheitswert gefunden oder aufgrund widersprüchlicher oder mangelnder Daten die weitere Suche beendet werden.

Im Verlauf von Weiterentwicklungen dieses Grundkonzepts "recognize- act-cycle"(168) wurden verschiedene Ergänzungen konzipiert. Der Bedingungsteil einer Regel kann so beispielsweise baumverzweigte Bedingungskomplexe enthalten. Zusätzlich wurden Änderungen des dynamischen Datenspeichers ohne Aktivierung des Aktionsteils einer Regel ermöglicht sowie Subroutinen bei der Problemlösung zugelassen. Ebenso wurde die Struktur des Aktionsteils von Regeln verändert, so daß eine probeweise Anwendung von Regeln ohne Änderung der Fakten im dynamischen Datenspeicher erfolgen kann. Zusätzlich können, unabhängig von der dynamischen Datenbasis, andere Regeln direkt aktiviert werden, indem im Schlußfolgerungsteil einer Regel die Nummer der nachfolgenden Regel verankert wird. Auch die Struktur des aktuellen Datenspeichers wurde geändert; um komplexere Informationen integrieren zu können, wurden verschiedene Konzepte entwickelt: z.B. MYCIN's "context tree", HEARSAY's "blackboard", PROSPECTOR's "semantic net"(169). Weitere Verbesserungen von Produktionssystemen zeichnen sich bereits ab.

2.6.2 Schlußfolgerungsmöglichkeiten in Produktionssystemen

Die Fähigkeiten des Regelinterpreters oder der "inference engine" (170) sind von entscheidender Bedeutung für die Güte der Schlußfolgerungen in Produktionssystemen. Seine wichtigste Aufgabe besteht in der Steuerung und Kontrolle der Regelanwendungen. Dabei steht die Selektion problemadäquater Produktionsregeln im Mittelpunkt. Üblicherweise werden Regeln ausgewählt, indem

Regelbedingungen mit den externen Daten verglichen werden. Dabei wird die Auswahl der Regeln immer dann problematisch, wenn mehrere Regeln adäquat erscheinen und der Regelinterpreter einer Regel den Vorrang geben muß. Verschiedene Strategien wurden entwickelt, um diese, als "conflict-resolution" (171) bezeichnete Wahl zu unterstützen:

1. die Auswahl der ersten Regel nach zufallsgesteuerter linearer Anordnung aller in Frage kommenden Regeln (172),(173);
2. Selektion der Regel mit der höchsten Priorität, wobei die Rangfolge durch den Programmentwickler unter Berücksichtigung der zu lösenden Aufgabe festgelegt wird (siehe Programmsystem DENDRAL), "highest priority rule"(174);
3. die Auswahl der spezifischsten Regel, d.h. derjenigen Produktionsregel, deren Bedingungsteil die detaillierteste Information beinhaltet;
4. die Bevorzugung der Regel, die sich auf das zuletzt eingegebene Element im dynamischen Datenspeicher bezieht;
5. die Selektion einer Regel, deren Aktionsteil Ausführungen impliziert, die bei der bisherigen Problemlösung noch nicht stattgefunden haben;
6. die Anwendung einer beliebigen Regel;
7. die Ausführung aller Regeln ohne spezifische Selektion (s. Programmsystem MYCIN).

Fachspezifische Besonderheiten bilden die Grundlage der Entscheidung für eine dieser Strategien. Eine ebenso entscheidende Funktion des Regelinterpreters ist die Steuerung der Schlußfolgerungen. Die Determination der Richtung des Schlußfolgerungsprozesses ist von entscheidender Bedeutung für die Effizienz von Produktionssystemen. Prinzipiell unterscheidet man zwei unterschiedliche Vorgehensweisen:

1. die Vorwärtsverkettung(175) bzw. das "forward chaining"(176):
   hier bilden die Ausgangsdaten die Basis der Problemlösung, indem von diesen ausgehend Schlußfolgerungsmöglichkeiten gesucht werden, die zum anvisierten Ziel führen; diese Methode wird auch als "data driven, event driven, or bottom-up direction"(177) bezeichnet.

2. die Rückwärtsverkettung(178) bzw. das "backward chaining"(179):
   das hypostasierte oder erwartete Ziel bildet den Ausgangspunkt der Lösungssuche. Die Schlußfolgerungen werden in rückwärtige Richtung vollzogen, indem nach Regeln gesucht wird, welche die angenommene Hypothese bestätigen; diese Methode wird auch als "goal driven, expectation driven, or top-down thinking"(180) charakterisiert.

Die Vorwärtsverkettung geht damit von den anfänglich vorhandenen Fakten eines Problemfalls aus. Das System sucht nach Regeln, deren Bedingungen mit diesen Ausgangsdaten übereinstimmen, und zieht die entsprechende Schlußfolgerung der jeweils passenden Regeln. Die so hinzugewonnenen Daten stellen nun die Basis für die weitere Regelsuche dar. Die Rückwärtsverkettung erfolgt durch Überprüfung der Aktionsteile von Produktionsregeln, die mit der jeweiligen Hypothese oder Unterhypothese übereinstimmen müssen. Um eine Annahme als gültig einstufen zu können, werden die Bedingungen der Regeln überprüft. Stimmen diese mit den aktuellen Daten eines Problems überein, gilt die Hypothese als zulässig. Diese Methode der Problemlösung gleicht der Hypothesenverifikation bei wissenschaftlichen Problemlösungen und scheint für manche Fachgebiete die adäquatere Form der Schlußfolgerung zu sein als die Vorwärtsverkettung. "Backward running is the method of choice if a production system is being used to check out one particular hypothesis" (181). Grundsätzlich scheint die Vorwärtsverkettung in solchen Fällen die adäquatere Methode zu sein, wenn ein Ziel erreicht werden soll, daß sich durch Deduktion aus den verankerten Fakten ableiten läßt, während die Rückwärtsverkettung in all jenen Situationen günstiger erscheint, in denen Annahmen überprüft werden sollen. "The question is decided by the purpose of the reasoning and by the shape of the problem space"(182).
Die Entscheidung, welcher Schlußfolgerungsmechanismus in einem Produktionssystem angewandt wird, hängt letztlich vom jeweiligen Fachgebiet ab. Bestimmte Fachgebiete erfordern die Überprüfung aller möglichen Hypothesen, andere wiederum zielen auf eine stringente Überprüfung eines einmal eingeschlagenen Lösungsweges. Die Wahl spezifischer Suchprozeduren dient hier der Determination eines bestimmten Lösungsprinzips.

Auch in Produktionssystemen stellt sich das Problem der Unüberschaubarkeit großer Wissensbasen. Zur Vermeidung der damit einhergehenden Gefahr ineffizienter Suchvorgänge wurden Strategien zur Strukturierung der Wissensbasen entwickelt. Mögliche Methoden sind eine Markierung der Regeln ("indexed") und eine Abspaltung problembereichsverwandter Regeln ("partitioned") (184).

2.6.3 Einschätzung von Produktionssystemen

Als entscheidender Vorteil von Produktionssystemen wird der modulare Aufbau der Wissensbasen genannt. Die unabhängig voneinander verankerten Produktionsregeln "behave much like independent pieces of knowledge"(185). Da die Produktionsregeln nicht direkt miteinander interagieren (zumindest in der ursprünglichen Konzeption nicht), sondern lediglich die Ergebnisse ausgeführter Aktionen im dynamischen Datenspeicher verankert werden, sind Modifikationen der Wissensbasis relativ unproblematisch zu realisieren, ohne daß Inkonsistenzen in der Wissensbasis zu befürchten sind.

Als zusätzliches positives Kriterium wird die Uniformität ("uniformity"(186)) der Repräsentationsform angeführt. Da jedes Wissen in die einheitliche Struktur von Produktionsregeln übersetzt wird, ist die Wissensbasis für den Benutzer leicht verständlich und überschaubar.

Ein dritter, sehr wichtiger Vorzug wird in der 'Natürlichkeit" ("naturalness"(187)) der Wissensstruktur gesehen. Man geht innerhalb der KI-Forschung davon aus, daß viele Menschen ihr Wissen ohnehin in "Wenn-Dann"-Verknüpfungen beschreiben, insbesondere bei der Darstellung von Handlungssequenzen und Kausalbeziehungen. "Statements about what to do in predetermined situations are naturally encoded into production rules"(188). So nimmt man an, daß die Transformation jenes Wissens in die Regelstruktur keinen Verlust von Wissen impliziert; deshalb werden vor allem in Expertensystemen, die ja auf die Verankerung eben jenen Wissens zielen, Wissensbasen oftmals auf der Basis von Regeln konzipiert.

Produktionssysteme bergen jedoch auch Probleme in sich. Ein besonderer Nachteil ist die mögliche Ineffektivität der Schlußfolgerungen. Suchprozesse sind oftmals langwierig und schwerfällig, so daß zunehmend nach Möglichkeiten gesucht wird, diese Mängel zu beheben, z.B. durch die Verankerung direkter Hinweise auf nachfolgend zu bearbeitende Regeln im Aktionsteil.

Ein zweites wesentliches Defizit von Produktionssystemen ist die fehlende Transparenz ("opacity"(189)) der systeminternen Problemlösung. Obwohl die einzelnen Produktionsregeln die Relation zwischen Bedingungen und Aktionen sehr anschaulich repräsentieren, ist durch die Isolation der Produktionsregeln voneinander der generelle Lösungsweg zur Bewältigung eines spezifischen Problems nur schwer überblickbar. Ebenso erlaubt die strenge Struktur der Regeln keine Hierarchie von Subproblemen, wie es für die menschliche Form der Problemlösung typisch zu sein scheint.

Grundsätzlich erscheint es für die Konzeption eines effizienten Produktionssystems aber notwendig, neben einer größeren Variabilität der Regelstruktur wirksame Kontrollstrategien zu implementieren, die sowohl die Regelselektion als auch die Anwendung und Abfolge der Produktionsregeln unter heuristischen Gesichtspunkten steuern. Ebenso scheint es angebracht, bei größeren Wissensbasen, d.h. einer hohen Anzahl von Produktionsregeln Subsysteme zu bilden, die jeweils einzelne Teilbereiche des Fachgebietes repräsentieren. Dies setzt jedoch wiederum die Verankerung von Kontrollregeln voraus, um den Transfer zwischen den Subsystemen zu gewährleisten.

Resümierend scheinen bestimmte Anwendungbereiche eine Präferenz von Produktionssystemen nahezulegen; zu diesen Gebieten zählen Davis und King (1977) folgende:

- Bereiche mit diffusem, faktenreichem Wissen (z.B. die klinische Medizin);
- Gebiete, in denen Prozesse in voneinander unabhängige Aktionen unterteilt werden können;
- Zweige, die eine Trennung des Wissens von der Art seiner Benutzung zulassen.

Nach Auffassung der KI-Forscher liegt demnach der entscheidende Vorzug von Produktionssystemen in der Möglichkeit, Handlungen in bedingungsabhängige Statusänderungen zu übersetzen und eine Problemlösung als situationsspezifische Abfolge von Aktionen zu begreifen. "If we can view the task at hand as a sequence of transitions from one state to another in a problem space...., we can model this behaviour with production systems, since each transition can be effectively represented by one or more production firings" (190). Die Problematik und die Grenzen einer solchen Sichtweise werden im Kapitel 'Expertensysteme' behandelt.

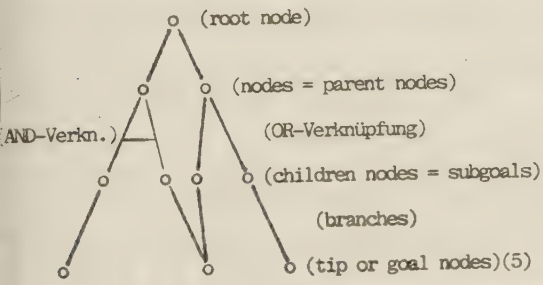
1 Problemlösungen und Kontrollfunktionen in KI-Systemen

1.1 Das Problemkonzept in der KI-Forschung

Die Entwicklung von Strategien zur Problemlösung stellt einen wesentlichen Schwerpunkt bei der Konzeption von KI-Systemen dar. Oftmals wird sogar die KI-Forschung insgesamt mit der Suche nach effektiven Problemlösungstechniken verglichen: "Artificial Intelligence is the study of techniques for solving exponentially hard problems in polynomial time by exploiting knowledge about the problem domain"(1). In den folgenden Abschnitten werden daher verschiedene Methoden dargestellt, die in Kombination mit Wissensbasen Programme zu leistungsfähigen Problemlösungen befähigen.

Wie bereits erwähnt, wird ein Problem in einem KI-Programm etwa wie folgt dargestellt: Die Ausgangsdaten und das bekannte oder angenommene Endresultat determinieren die äußeren Grenzen eines Problemraums. Innerhalb dieses Raums sind unterschiedliche Problemstadien verankert, die das Problem spezifizieren. Dieses Konzept wird auch als "state space representation" bezeichnet(2).

Problemlösungen werden in der KI-Forschung häufig mit Suchprozessen gleichgesetzt ("state space search"). So nimmt man an, daß die Lösung eines Problems gefunden wird, indem ein Problemraum bzw. die verschiedenen Problemstadien durchlaufen werden. Dabei ist der Lösungsweg durch problemspezifische Operatoren oder Regeln determiniert, deren Anwendung zu den jeweiligen Zwischenstadien oder Unterzielen bzw. letztlich zur Lösung des Problems führen. Diese Form der Problemlösung wird in der KI-Forschung oftmals durch einen sogenannten Lösungsbaum oder "goal tree" (3) visualisiert, wobei die einzelnen Knoten ("nodes") des Zielbaumes den Problemstadien oder Unterzielen entsprechen. Die Verknüpfungen zwischen den Knoten, als Zweige oder "branches"(4) bezeichnet, markieren mögliche Lösungswege durch den Problemraum, d.h. weisen auf potentielle Assoziationen zwischen unterschiedlichen Problemstadien oder Unterzielen hin. Zur Illustration wird im Folgenden ein derartiger Lösungsbaum dargestellt:



Die Lösung eines Problems in diesen graphischen Suchbäumen ("Graph-Search-Trees")(6) wird durch markierte Lösungspfade, sogenannte "paths" vom Ausgangs- bis zum Zielzustand illustriert; "the problem of finding a sequence of rules transforming one database into another is equivalent to the problem of finding a path in a graph"(7).

Wesentlich für das Problemkonzept in der KI-Forschung ist die Annahme, daß Problemlösungen häufig auf der Formulierung von Unterzielen basieren. Die Methode, über Unterziele die endgültige Lösung zu erreichen, wird häufig als "goal reduction" oder "problem reduction" bezeichnet(8). Um graphisch zu illustrieren, daß für manche Ziele das Erreichen aller Unterziele notwendig ist, bei anderen jedoch lediglich ein Unterziel erreicht werden muß, sind unterschiedliche Verknüpfungen im Lösungsbaum möglich: AND-Verknüpfungen und OR-Verknüpfungen, die inhaltlich den logischen Junktoren entsprechen. Die meisten Lösungsbäume in der Künstlichen Intelligenz sind Kombinationen, sogenannte "AND/OR-trees"(9).

Die Konzeption eines KI-Systems auf der Basis eines Lösungsbaum erweist sich in der Praxis oft als hilfreich. "Evidently the node-and-link description is a good description with respect to the problem posed, for it's easy to make, and once we have it, the problem is simple"(10).
Um eine formale Beschreibung eines Problems zu realisieren, bedarf es damit folgender Vorgehensweisen:

1. Festlegung eines Zustandsraumes, der alle möglichen Konfigurationen eines spezifischen Problembereichs festlegt,
2. Determination des Ausgangszustandes ("initial state"(11)),
3. Definition des Zielzustandes ("goal state"(12)),
4. Bestimmung der Operatoren (Regeln), die für den Lösungsprozeß entscheidend sind.

"The problem can then be solved by using the rules, in combination with an appropriate control strategy, to move through the problem space until a path from an initial state to a goal state is found"(13). Ein Problemlösungssystem ist also durch einen Problemraum charakterisiert, in dem Operatoren eine Modifikation der Datenbasis vom Ausgangs- zum Zielzustand vornehmen. Die Festlegung der verschiedenen Stadien, die ein Problem charakterisieren, setzt natürlich voraus, daß die Repräsentation beschränkt werden muß auf wesentliche Details, d.h. nur Wichtiges bzw. die als wesentlich erachtete Fakten werden explizit dargestellt. Gefordert wird zudem die Berücksichtigung der natürlichen Einschränkungen ("natural constraints")(14) eines Problembereichs. Diese Anforderung impliziert jedoch die Gefahr, daß die Eingrenzung der zu implementierenden Fakten dazu führt, daß unwesentlich scheinende, jedoch im Endeffekt wichtige Aspekte unberücksichtigt gelassen werden, um die Effizienz einer komprimierten Repräsentation zu wahren. Die immer wieder auftretende Gefahr der Simplifizierung komplexer Zusammenhänge in der KI-Forschung wird hier erneut offenbar.
Bei der Konzeption problemlösender Programme stehen folgende Fragen im Vordergrund, die Aufschluß über die grundlegenden Konzepte der Problemlösung in der KI-Forschung geben:

1. Läßt sich ein Problem in Unterprobleme zergliedern?

Mithilfe einer einfachen Prozedur, "a simple recursive integration program"(15), kann auf jeder Stufe eines Problemlösungsvorgangs überprüft werden, ob das Problem global lösbar ist oder ob es in kleinere Probleme aufgegliedert werden kann, die rekursiv abgearbeitet werden. Mit der Unterteilung einer komplexen Aufgabe in Unterziele lassen sich auch große Probleme lösen, wobei allerdings berücksichtigt werden sollte, daß eine Aufgliederung des Problems nicht immer möglich ist, zumal als Voraussetzung die Unabhängigkeit der Unterziele voneinander gewährleistet sein muß.

2. Können Lösungsschritte, die sich als falsch erwiesen haben, einfach ignoriert werden?

Fehler bei der Problemlösung können in den meisten Fällen wieder rückgängig gemacht werden; hierbei ist entscheidend, ob der falsche Weg im Programm verankert bleiben soll zwecks möglicher Rückkehr und der Beantwortung von Fragen oder ob er aus dem Programm gelöscht wird. Man differenziert an diesem Punkt zwischen drei Klassen von Problemen:
- Probleme, bei denen Lösungsschritte ignoriert werden können,
- Probleme, bei denen Lösungsschritte wieder rückgängig gemacht werden können,
- Probleme, bei denen Lösungswege unwiderruflich sind, die deshalb Planungen vor Beginn eines Lösungsvorganges erfordern(16).

Die Besonderheit der Problemstruktur legt damit die Bedingungen fest für die Art der Kontrollregeln.

3. Läßt sich der Umfang des Problemraums vorab determinieren?

Die Frage, inwieweit alle Stadien, die im Verlauf einer Problemlösung durchlaufen werden, vorhersehbar sind, stellt sich unterschiedlich dar; so existieren klar strukturierte Probleme, die eine exakte Vorhersage erlauben, jedoch auch eine Fülle anderer Probleme, bei denen die möglichen Stadien nicht mit Sicherheit prognostiziert werden können. Damit stellt sich für diese die Notwendigkeit einer flexiblen Problemlösungsstruktur, die mehrere Alternativen und die Integration von Wahrscheinlichkeiten notwendig macht, d.h. "use probabilities of the various outcomes to choose a plan that has the highest expected probability of leading to a good score on the hand"(17). Viele der nicht vorab determinierbaren Problembereiche garantieren höchstens gute, jedoch keine sicheren Lösungspläne, so daß Planrevisionen notwendiger Bestandteil derartiger Programme sein müssen. Hier muß darauf hingewiesen werden, daß es gerade in wissenschaftlichen Anwendungsgebieten Problemfelder gibt, deren Lösungen einerseits unwiderruflich sind und andererseits bei ihren Vohersagen ein hohes Maß an Unsicherheit aufweisen, so daß Lösungen vorab kaum bestimmbar sind.

4. Kann man eine Lösung eindeutig als qualitativ gut klassifizieren, ohne daß ein Vergleich mit möglichen anderen Lösungen notwendig wird?

n differenziert grundsätzlich zwischen Systemen, die nach der optimalen Lösung suchen und ogrammen, die lediglich eine Lösung anstreben ("any-path problems and best-path oblems"(18)); der Suchprozeß wird entsprechend als "best-value search" oder "satisficing arch"(19) bezeichnet. Vor der Entwicklung von problemlösenden Programmen muß also geklärt rden, ob eine gute Lösung ausreichend ist oder ob eine optimale angestrebt werden muß.

Ist die Wissensbasis des Problemfeldes konsistent?

nige Bereiche bieten den Vorteil, über eine widerspruchsfreie Wissensbasis zu verfügen; hier nd letztlich nur die Mathematik bzw. mathematische Beweissysteme zu nennen. Viele Problemreiche des alltäglichen Lebens sowie die meisten Wissenschaftszweige bergen Widersprüchlichiten in sich, die eindeutig gültige Ableitungen nicht in dem Maße zulassen, wie es etwa bei eorem-Beweiser-Systemen der Fall ist. "Many reasoning schemes that work well in consistent mains are not appropriate in inconsistent ones" (20).

Welches Wissen benötigt man für Strategien zur Problemlösung und Kontrollsteuerung?

e Frage, welcher Umfang an Wissen für die Konzeption eines Problemlösungssystems in einem stimmten Gebiet notwendig ist, impliziert zunächst die Unterscheidung von speziellem, d.h. oblemspezifischen Wissen gegenüber generellem Wissen, das, über das Problemfeld hinausgehend, ntergrundwissen allgemeiner Art beinhaltet. Zusätzlich ist eine Identifikation der Fakten nes Problemgebiets vorzunehmen, die als wesentlich betrachtet werden für die Konzeption einer ssensbasis. Damit einher geht die Überprüfung, inwieweit dieses Wissen bereits Problemlösungsthoden beinhaltet oder ob diese zusätzlich implementiert werden müssen.

Kann der Computer ein Problem eigenständig bewältigen oder bedarf es der dauernden Interction zwischen Benutzer und Maschine?

ach hier differenziert man zwischen zwei verschiedenen Arten von Systemen. So sind einerseits rogramme zu nennen, die nach dem Prinzip "problem-in, solution-out"(21) arbeiten, wie z.B. die athematischen Beweissysteme, die völlig benutzerunabhängig Lösungen produzieren. Andererseits enötigt man beispielsweise in Expertensystemen die Möglichkeit einer ausführlichen Interaktion, icht zuletzt, um dem Benutzer die computerinterne Vorgehensweise bei einer Problemlösung ransparent zu machen. Rich (22) unterscheidet dementsprechend zwischen zwei Systemtypen: den olitary"- und den "conversational"- Programmen.

usammenfassend setzt die Konzeption eines Problemlösungssystems eine präzise Vorabstrukturierung voraus, die im wesentlichen in der Einschränkung des Problemraums und der Identifikation er als relevant erachteten Fakten sowie der geeigneten Operatoren besteht. So impliziert die ntwicklung eines Problemlösungssystems die genaue Determination von Ausgangszustand und ngestrebtem Ziel, die Festlegung möglicher Stadien, die im Laufe des Lösungsprozesses durchaufen werden, die Suche nach einer angemessenen Repräsentationsform des "problem space" sowie ie Bestimmung von Operatoren oder Regeln, durch deren Anwendung das jeweilige Ziel erreicht erden kann. Die verschiedenen Methoden der problemlösung werden im Folgenden dargestellt.

.1.2 Suchprozeduren

ie bereits erwähnt, wird in der KI-Forschung der Problemlösungsvorgang im wesentlichen mit inem Suchprozeß gleichgesetzt. Damit entspricht eine Problemlösung der Suche nach einem Pfad urch verschiedene Problemstadien (Knoten), wobei Anfang und Ende der Suche durch die entprechenden Grenzen (Anfangs- und Endknoten) des Problemraums festgelegt sind.
ei der Analyse von Suchprozeduren stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

. Die Richtung der Suche

er Suchprozeß kann vorwärts oder rückwärts gerichtet sein; dabei dient die Problemstellung als asis für die Entscheidung über die Richtung des Suchvorgangs. Eine vorwärts gerichtete Suche eginnt bei den Ausgangsdaten und nimmt eine Selektion von Regeln dahingehend vor, daß die Prämissen mit dem Ausgangszustand übereinstimmen. Die rückwärtige Suche beginnt beim Zielzustand nd sucht nach Regeln, deren Schlußfolgerungen mit dem Ziel äquivalent sind.

. Die Topologie des Suchprozesses

Drei Faktoren beeinflussen die Entscheidung, in welche Richtung der Suchprozeß stattfinden soll:

- Die Anzahl der Anfangs- oder Endknoten, die möglichen Anfangs-und Endsituationen entsprechen, ist ein wesentlicher Indikator für die Wahl der Suchrichtung. Weist z.B. das Ziel eine geringere Anzahl von Knoten auf als der Ausgangszustand, wird die Rückwärtsverkettung bevorzugt, da die Zahl der anzuwendenden Suchprozeduren ansonsten unangemessen hoch wird und die Suche rasch ineffektiv werden kann.
- Häufig wird die Suchrichtung bevorzugt, die weniger Verzweigungsmöglichkeiten aufweist, d.h. eine geringere Anzahl möglicher Lösungswege impliziert.
- Falls die systeminterne Problemlösung für den Benutzer transparent sein muß, wird die Suchrichtung der Art und Weise angeglichen, wie der Mensch das entsprechende Problem angeht.

3. Die Anwendung einer heuristischen Funktion zur Steuerung und Einschränkung der Suche

Als Heuristiken werden hier Techniken bezeichnet, die Suchprozesse auf der Basis von Wissen und Bewertungen einschränken. Eine heuristische Information ist eine "task-dependent information to help reduce search" (23). Man unterscheidet zwischen allgemeiner und problemspezifischer Heuristik. Durch heuristische Strategien sollen die "Kosten", d.h. der Aufwand eines Suchvorganges, minimiert werden, man spricht in diesem Zusammenhang von der "heuristic power" eines Systems (24). Eine heuristische Suche impliziert die Verfolgung eines möglichst erfolgreich scheinenden Lösungsweges. Dies wird häufig durch numerische Schätzwerte realisiert, die den einzelnen Knoten eines Lösungsbaumes zugeordnet sind und deren Addition einen Gesamtschätzwert ergibt, der als Indikator für die Effizienz eines Lösungsweges fungiert.
Die verschiedenen Suchprozeduren, die im Rahmen der KI-Forschung entwickelt wurden, lassen sich wie folgt unterscheiden:

1. Problemlösung ohne Berücksichtigung eines Optimums

- nichtheuristische Prozeduren; "depth-first", "breadth-first"(25),
- heuristische Prozeduren. "Hill climbing", "Beam", "Best-first"(26),

2. Suche nach der optimalen Lösung:

- "British Museum",(27);
- "Branch and bound", "Dynamic programming", "A*"(28).

3. Spielsuchprozeduren

- "Minimax", "Alpha-beta pruning", "progressive deepening", "heuristic pruning", "heuristic continuation"(29).

Die wichtigsten dieser Suchstrategien werden im folgenden ausführlich dargestellt.

3.1.2.1 Nichtheuristische Suchprozeduren

"Depth-first search"

Das zugrundeliegende Prinzip dieses Suchverfahrens besteht in der linearen Verfolgung eines einmal eingeschlagenen Lösungsweges. Diese Suchstrategie läßt sich am besten anhand eines Lösungsbaums verdeutlichen: ausgehend von einem Ausgangsknoten wird die äußerst linke Kante des Suchbaums verfolgt, wobei der Lösungspfad bis in die jeweils tiefste Ebene verfolgt wird (deshalb auch die Bezeichnung: "Tiefe-Zuerst-Suche"(30)). Die Alternativen, die sich auf jeder Ebene eines Suchbaums durch die anderen Knoten ergeben, werden nur dann berücksichtigt, wenn sich der verfolgte Pfad als Sackgasse entpuppte, so daß ein neuer Weg (der im Suchbaum jeweils rechts vom gerade absolvierten liegt) eingeschlagen werden muß.

eingeschlagener Weg

; wird hier sofort ersichtlich, daß sich dieses Verfahren immer dann als ineffizient erweist, nn sich die Lösung nicht durch die unmittelbar zu absolvierenden Pfade (die jeweils linken im chbaum) erzielen läßt, da jeder Weg bis zum Ende überprüft wird, ohne daß Alternativen auf der eichen Ebene ausgelotet werden können.

.e "Hill-Climbing"-Prozedur

ı die Suchstrategie der "depth-first-search" effektiver zu gestalten, wurde die sogenannte ıill climbing"-Prozedur entwickelt, eine Methode, die ähnlich strukturiert ist wie lepth-first-search", jedoch zwischen den Knoten eines Lösungsweges heuristisch selektieren ınn. Jeder Entscheidungsknoten wird bezüglich seiner Entfernung zum angestrebten Ziel über- rüft. Dabei wird der Weg eingeschlagen, der am ehesten zum Ziel zu führen scheint. Die Ent- ernung von einem Problemstadium bis zum Ziel ist als numerischer Schätzwert jedem Knoten ugeordnet. Jeweils der kleinste numerische Wert wird ausgewählt; je besser die Schätzung ist, esto effizienter ist die Methode. "Hill climbing is depth-first-search plus a method for rdering the alternatives at each decision point. In hill climbing a movement proceeds through ne alternative which offers the best improvement to the situation in one step"(31). Diese uchmethode impliziert jedoch Probleme: wenn Knoten zwar ein lokales Optimum, insgesamt gesehen edoch nicht die optimale Lösung implizieren; diese Problematik wird als "foothill problem"(33) ezeichnet. Eine weitere Schwierigkeit ("Plateau problem"(34)) offenbart sich, wenn alle lternativen gleichwertig sind, d.h. die gleichen numerischen Schätzwerte haben; hier stellen prünge in andere Suchräume oftmals eine Abhilfe dar. Ein weiteres Problem, ("ridge roblem"(35)), tritt dann auf, wenn alle Alternativen schlechtere Lösungen bieten als die ereits erreichten Knoten, die Effizienz des Suchvorgang also abzunehmen scheint; hier erweist ich die Implementation zusätzlicher Alternativen als hilfreich.

Grundsätzlich ist die Hill-Climbing-Methode in kleinen Problembereichen als wirksam einzustufen, jedoch erweist sie sich bei komplexeren Aufgaben oft als ineffektiv. Als insgesamt problematisch zu bewerten ist die Zuordnung numerischer Schätzwerte zu den Knoten eines Suchbaums. Nicht nur erweist sich die Zuweisung solcher Faktoren in der Praxis als schwierig, sondern zudem ist auch das Abwägen der Güte eines Lösungsweges oft derart komplex, daß eine Repräsentation durch numerische Werte nicht adäquat ist.

Die "Breadth-first search"

Diese Strategie unterscheidet sich von den beiden oben genannten Prinzipien dadurch, daß hier zunächst alle Knoten einer Ebene,d.h. alle Entscheidungsalternativen eines Problemstadiums überprüft werden, bevor ein Lösungsweg verfolgt wird. Die folgende Graphik soll dies veran- schaulichen:

alle Knoten einer Ebene
werden zunächst überprüft

Diese Suchprozedur impliziert, ähnlich wie die "depth-first-search" die Gefahr ineffizienter Operationen. Zwar werden hier die Lösungswege nicht bis zu ihrem jeweiligen Ende durchlaufen, doch erweist sich die Überprüfung aller möglichen Knoten einer Ebene in der Praxis oftmals als ebenso schwerfällig. "Breadth-first search is particular inappropriate in situations in which there are many paths that lead to solutions but each of them is quite long"(36).

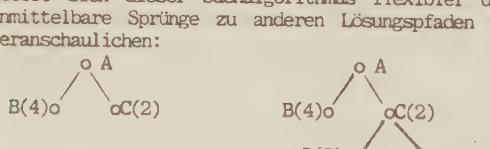
Der "beam search" - Algorithmus

Um die häufige Redundanz der Suchvorgänge der "breadth-first-search" zu vermeiden, wurde mit der "beam search" als Verbesserung dieses Suchverfahrens entwickelt. Das Prinzip dieser Strategie basiert darauf, auf jeder Problemebene nur die jeweils besten Alternativen zu expandieren. Wie bei der Hill-climbing- Methode werden den einzelnen Knoten Schätzwerte zugeordnet, die die Nähe zum angestreben Ziel markieren. Entscheidend ist, daß grundsätzlich die Vorgehensweise der "breadth-first search" eingehalten wird, d.h. zwar auf jeder Ebene jeweils der beste Knoten ausgewählt wird, nicht jedoch ad hoc ein vielversprechender Weg eingeschlagen werden kann. Die nichtheuristischen Graphsuchverfahren, "depth-first search" und "breadth-first search", bieten also den Nachteil, daß keine Informationen zur Einschränkung der Suche verwendet werden können.

"The uninformed search methods, wether breadth-first or depth-first, are exhaustive methods for finding paths to a goal node"(37). Damit existiert eine hohe Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Suchvorgänge langwierig und damit ineffektiv sind. Die heuristischen Verfahren, die aus diesen ursprünglichen Strategien abgeleitet wurden, erweisen sich hier oftmals als effektiver.

Die "Best-first Search"- Strategie

Eine Erweiterung der oben beschriebenen Prozeduren stellt die "best-first Search"-Strategie dar, da sie einen variableren Suchprozeß gestattet. Auch hier ist jedem Knoten ein numerischer Schätzwert zugeordnet, der die Distanz zwischen Knoten und Ziel kennzeichnet. Systemintern werden an jedem Knoten die Alternativen entsprechend der Höhe dieses Faktors sortiert. Unabhängig von einer Festlegung an Ebenen und Tiefen des Lösungsbaums wird der jeweils vielversprechendste Knoten expandiert und dann erneut mit allen offenen Alternativen verglichen. Damit stellt sich dieser Suchalgorithmus flexibler dar als die zuvor beschriebenen Methoden, da unmittelbare Sprünge zu anderen Lösungspfaden möglich sind. Eine kurze Graphik soll dies veranschaulichen:



Dieser Graph dokumentiert die Besonderheiten dieser Strategie: während zunächst Knoten C mit dem niedrigeren Wert gegenüber B gewählt wird, dann Knoten D (kleiner als E), wird nunmehr ein Rücksprung im System vorgenommen, da der Schätzwert von B als bislang nicht expandiertem Knoten kleiner ist als der von E, F und G. Die größere Flexibilität dieser Prozedur gegenüber den zuvor beschriebenen wird hier offenbar.
Für alle hier aufgeführten Methoden gilt, daß der Suchprozeß beendet wird, sobald eine Lösung gefunden wurde. Demgegenüber existieren andere Strategien, die nach der jeweils besten Lösung suchen. "The purpose of ordered search, of course, is to reduce the number of nodes expanded as compared to blind-search algorithms" (38). Im Folgenden werden somit Strategien dargestellt, die auf optimale Lösungen zielen.

3.1.2.2 Heuristische Suchverfahren

Die "British Museum Procedure"(39)

Dieses Verfahren bestimmt zunächst auf der Basis der breadth-first- und depth-first search alle möglichen Lösungswege und selektiert dann den jeweils kürzesten Pfad. Die Prozedur ist sehr zeitaufwendig und erweist sich infolgedessen bei komplexen Problemen als ineffektiv. Sie wird deshalb in der Praxis kaum angewandt.

Die "branch-and-bound search"(40)

Bei diesem Suchverfahren werden alle Lösungsalternativen eines Knotens überprüft, wobei stets der kürzeste Weg weiterverfolgt wird. Optimiert werden kann diese Suchmethode durch Schätzwerte, die den einzelnen Knoten zugeordnet sind. Diese numerischen Werte werden gebildet durch die Addition des Faktors für den bereits vollzogenen Weg mit einem Schätzwert über den noch zu vollziehenden Lösungsweg. Alle möglichen Lösungswege, die jeweils soweit expandiert werden, daß entschieden werden kann, ob sie überhaupt zu der gewünschten Lösung führen können, werden entsprechend der Größe ihrer numerischen Schätzwerte sortiert. Dabei gilt stets der kleinste dieser Schätzfaktoren als Selektionskriterium. Erweist sich dieser Lösungsweg als falsch, wird der Knoten expandiert, dessen Schätzwert in der Rangfolge hinter dem jeweils ausgeführten Knoten liegt. Die Gefahr besteht darin, daß einer der primär nichtberücksichtigten Knoten insgesamt gesehen zu einem kürzeren Lösungsweg führen kann, als dies für die gewählten Pfade zutrifft. Eine weitere Möglichkeit, das "branch-and-bound" - Verfahren zu verbessern, besteht in der Elimination redundanter Lösungswege; d.h. ein einmal eingeschlagener Weg wird weiterverfolgt, ohne daß die zuvor zurückgewiesenen Pfade jedesmal neu überprüft werden. Diese Methode wird auch als "dynamic programming principle" (41) bezeichnet.

"A* algorithm"(42)

der Basis dieser Suchstrategie, die ebenfalls auf eine optimale Lösung zielt, kann ein enannter "minimal-cost path"(44) gefunden werden. Diese Methode, von Nilsson, Hart und nael(45) entwickelt, legt den Wert einer Evaluationsfunktion f(n) fest, indem der Schätzwert einen Entscheidungsknoten aus zwei Komponenten berechnet wird: den "Kosten" des Lösungsweges Start bis zum aktuellen Problemstatus, g*(n), und dem geschätzten Wert vom jeweiligen tand bis zur angestrebten Lösung, h*(n). Daraus ergibt sich die Funktion "f*(n) = g*(n) + n)"(46). Um den Schätzwert als Basis der Selektion eines Weges begreifen zu können, muß och zuvor überprüft werden, ob die den evaluierten Faktoren entsprechenden Pfade auch sächlich zu einer korrekten Lösung führen können. Nilsson (47) entwickelte ein weiter- rendes Konzept: den sogenannten "AO*-Algorithmus" ("A heuristic search procedure for AND/OR ees". Diese Strategie ist ähnlich konfiguriert wie der A*-Algorithmus, jedoch existiert ätlich ein Grenzwert, ("Futility"(48), der als Meßfaktor für die Praktikabilität und Ökonomie es Lösungswertes fungiert. Erweist sich also der Schätzwert h*(n) über den noch zu vollzie- den Lösungsweg größer als dieser Grenzfaktor, wird der entsprechende Weg als ineffizient elehnt. Zudem haben hier die beiden Werte der Schätzfunktion, g*(n) und h*(n) jeweils erschiedliche Gewichtung für die Lösungssuche; so läßt sich mit Hilfe des Wertes g*(n) der imale Lösungsweg bestimmen, während h*(n) lediglich festlegt, wie eine Lösung gefunden werden n. "Thus the A* algorithm can be used whether we are interested in finding a minimal-cost erall path or simply any path as quickly as possible"(49).

r jede der drei zuletzt genannten Methoden existieren Bedingungen, die für die Selektion einer stimmten Strategie entscheidend sind: die "branch-and-bound"- Methode ist besonders dann zu vorzugen, wenn eine gute Schätzung über die Länge der Lösungspfade vorliegt; die Strategie des ynamic programming" bietet Vorteile, wenn sich an einem Entscheidungspunkt viele Alternativen bieten; und der "A*"-Algorithmus kann angewandt werden, wenn beide Bedingungen zutreffen.

e zuvor erwähnten Spielsuchprozeduren sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert rden. Sie stellen insofern andere Suchstrategien dar, als dabei immer die Position eines geners mitbedacht werden muß. Da derartige Konzepte in problemlösenden KI-Programmen, wie ipielsweise den Expertensystemen, nur eine untergeordnete Rolle, wird auf eine genauere rstellung verzichtet.

1.3 Kontrollregeln und Kontrollsteuerung in KI-Systemen

ntrollregeln stellen eine weitere wesentliche Komponente von KI-Systemen dar, da sie wichtige nktionen bei der systeminternen Problemorganisation übernehmen. Kontrollstrategien entscheiden er die Anwendung des gespeicherten Wissens, selektieren zwischen alternativen Prozeduren der roblemlösung und steuern die Interaktion zwischen den angewandten Regeln und Verfahren. Im nterschied zu Suchprozessen, die auf das Finden eines Lösungsweges in einem Problemraum zielen, ichtet sich die Kontrollsteuerung auf die problemadäquate Auswahl unter den verschiedenen uchprozeduren, ist damit also die übergeordnete Instanz, die Eigenart und Güte von Problem- ösungen in KI-Systemen determiniert.

ontrollregeln müssen über Wissen verfügen, um entscheiden zu können, welche Problemlösungs- trategie bei spezifischen Problemen angewandt werden soll. Dieses Wissen kann an verschiedene omponenten eines Programms gebunden sein. So differenziert man in der KI-Forschung zwischen iner "action-centered, object-centered and request-centered control"(50). Eine aktionsgebundene ontrollstrategie impliziert die direkte Verknüpfung von Problemlösungsprozeduren und Wissen ber mögliche Unterprozeduren und spezifische Problemanwendungen; die Kontrollsteuerung ist also n den Prozeduren selbst verankert. Dagegen findet bei den objektzentrierten Kontrollstrukturen eine unmittelbare Einbindung des Kontrollwissens in die Objektklassifikation statt; so werden ei der Determination bestimmter Objektklassen die relevanten Prozeduren unmittelbar in die bjektrepräsentation integriert: "A system exhibits object-centered control when the system's class descriptions specify how to deal with objects in their own class"(51). Die "request- entered control" ist eine Form der Kontrollsteuerung, bei der jede Problemlösungsprozedur Wissen über die für sie relevanten Probleme beinhaltet. Auf einer programminternen "blackboard"(52), in einem Zwischenspeicher also, sind die spezifischen Fähigkeiten jeder Prozedur verankert, die dann im jeweiligen Problemfall in Kraft treten. Sind mehrere Prozeduren roblemadäquat, muß eine Selektion stattfinden, die entweder rein zufällig sein kann oder aber durch detaillierte Informationen in den Prozeduren gesteuert wird.

Die Auswahl von Prozeduren und die Steuerung der Prozedurabfolge stellen die wichtigste Aufgaben der Kontrollstrategien dar; darüberhinaus impliziert die Kontrollsteuerung oftmals auch die Indizierung einer unnützen oder falschen Anwendung von Prozeduren sowie die Verteilung von Computerressourcen (Computerzeit)(53).

Eine weitere entscheidende Funktion von Kontrollregeln ist die Steuerung der Interaktion zwischen den verschiedenen Problemlösungsprozeduren; als Interaktion bezeichnet man hier die Datenübertragung zwischen den Prozeduren. Bei den Botschaften, die die Prozeduren austauschen können, handelt es sich meistens um Listen, die Werte beinhalten, wobei diese Werte eine Spezifizierung von Objekten darstellen. Entscheidend für eine korrekte Datenübertragung sind die sogenannten "sender-receiver conventions determining the role of each value in the list" (54) Verschiedene Formen der Kommunikation zwischen Prozeduren sind möglich. Die "private-line method"(55) kennzeichnet die unmittelbare Interaktion zwischen zwei Prozeduren; Wertzuweisungen finden jeweils nur zwischen den beiden betroffenen Prozeduren statt. Eine andere Form der prozeduralen Kommunikation ist die sogenannte "party-line method", auch "blackboard method" genannt(56). Die zu übertragenden Daten werden hier in einer allgemein zugänglichen, zentralen Datenbank registriert und jeweils von den betroffenen Prozeduren abgerufen. Eine dritte Möglichkeit ist die Speicherung von zu übertragenden Daten in speziellen Speicheradressen, die jeweils nur spezifischen Prozeduren zugänglich sind; diese Methode wird als "reserved-spot method" bezeichnet. Jeder Prozedur ist die Kenntnis über die Speicherabschnitte zugeordnet, die für sie relevant sind. Damit ist eine Aufgliederung der Daten nach Problemgebieten möglich, was zu einer Einschränkung der Suchprozesse führt.

Die Kontrollprozeduren, die in einem Problemlösungssystem verankert sind, lassen sich nach ihren Funktionen unterscheiden. Die meisten Prozeduren beinhalten Handlungen, d.h. "they do something"(57). Jedoch existieren auch Strategien, sogenannte "finders"(58), deren Ziel die Suche nach Möglichkeiten ist, die handlungsorientierten Prozeduren anzuwenden. Als dritte Gruppe sind die Prozeduren zu nennen, die aufzeigen, daß es keine Möglichkeit gibt, eine suchende oder handelnde Prozedur zu aktivieren; diese Prozeduren werden als "skeptics"(59) bezeichnet.

Die entscheidenden Komponenten einer Kontrollstruktur sind damit folgende:

1. Lokalisation des Wissens über Prozeduranwendungen ("action-centered, object-centered, request-centered")
2. Selektion der problemadäquaten Prozeduren (zufällig, heuristisch, durch detaillierte Informationen)
3. Verteilung der Computerressourcen (Prioritätensetzungen, Determination unnützer Prozeduren)
4. Bestimmung der spezifischen Art von Prozeduren ("do things", "finders", "skeptics")
5. Festlegung der Kommunikationsform zwischen den Prozeduren ("private-line","blackboard method","reserved-spot method").

Im Folgenden werden zwei besonders wichtige Formen der Kontrollsteuerung dargestellt: Die "agenda-driven control structure"(60) und die Kontrollstrukturen in Produktionssystemen.

Die "agenda-driven control structure"(61) basiert im wesentlichen auf der Implementation einer sogenannten "Agenda"(62). Eine Agenda beinhaltet Listen mit allen von einem System zu bewältigenden Aufgaben. Ein Problem wird hier gelöst, in dem von der Agenda die jeweils vielversprechendsten Aufgaben zur Lösungsfindung abgerufen und abgearbeitet werden. Als Beispiel für die Anwendung einer "agenda-driven control structure" kann das System "AM"(63) dienen; dieses mathematische Programm enthält eine kleine Faktenbasis über Zahlentheorie und eine Sammlung von Operatoren, mit deren Hilfe neue Ideen entwickelt werden können. Um die Bildung neuer Konzepte zu begrenzen, wurde dem System über eine Agenda die Selektion der "most promising tasks"(64) ermöglicht. Da jeder Aufgabe in einer Agenda eine Liste von Gründen ("justi-fications"(65)) beigeordnet ist, die beinhalten, warum eine Aufgabe vorgeschlagen wird, und darüberhinaus jede Aufgabe einen Wichtungsfaktor ("weightings" (66)) über ihre Güte enthält, wird die Auswahl einer problemgerechten Aufgabe erleichtert. Die Aufgaben einer Agenda enthalten entweder ein explizites Statement über zu vollziehende Schritte oder weisen lediglich auf neue zu absolvierende Aufgaben hin. Dabei bestimmen die "justifications" und die "weightings", welche Aufgaben für ein bestimmtes Problem am entscheidensten sind. Zusätzlich sind auch negative Wichtungsfaktoren möglich, um die Inadäquatheit von Aufgaben für spezielle Erfordernisse festlegen zu können. Die zentrale Struktur einer Agenda wie auch die Rangordnung der Aufgaben ermöglichen die Bewältigung

komplexen Problemen und beinhalten durch die ständige Neuordnung der Rangfolge ein hohes Maß Flexibiltät bei der Lösungsfindung. "They provide an excellent way of integrating information m a variety of sources into one program, since each source simply adds tasks and stifications to the agenda"(67). Die Kontrollsteuerung durch die Implementation von "Agendas" idet aus eben diesen Gründen immer häufiger Anwendung, vor allem im Zusammenhang mit der zeption von Expertensystemen. Besonders hervorzuheben ist dabei, daß anstelle der Aufgaben h Hypothesen gesetzt werden können, denen ebenso Wichtungsfaktoren über ihre angenommene Güte s auch die Gründe für ihre Annahme zugeordnet werden können.

e Kontrollsteuerung in Produktionssystemen unterscheidet sich nicht wesentlich von den oben nannten Prinzipien, so daß im folgenden nur kurz auf einige abweichende Punkte eingegangen rden soll. Auch hier beziehen sich die Kontrollstrategien vor allem auf die Auswahl von geln, die zur Lösung eines Problems führen. Nilsson(68) unterscheidet zwei Formen von Kon-ollregeln:

unwiderrufbare ("irrevocable") Kontrollstrategien
testende ("tentative") Kontrollstrategien.

hrend die erste Gruppe eine unabänderliche Regelauswahl vornimmt, läßt die zweite Strategie rsuchsweise eine Auswahl zu, die jederzeit geändert werden kann. Eine unwiderrufliche Kon-rolle ist beispielsweise eine Funktion, die auf eine Dezimierung der Differenz zwischen sgangs- und Zielzustand in einem Problemraum zielt und kontinuierlich abgearbeitet wird. sgesamt gesehen ist diese Form der Kontrolle zu unflexibel, als daß sie größere Bedeutung nnehmen könnte.

ei den probierenden Kontrollstrategien, die wesentlich häufiger angewandt werden, differenziert n zwischen der "backtracking"-Methode und der "graph-search control"(69). Das Backtracking laubt durch Festlegung eines sogenannten "backtracking point"(70) die Rückkehr zu einer so rkierten Regel, sobald eine neue Regelauswahl vorgenommen werden soll(71). Die Backtracking-thode setzt nicht unbedingt die Einbeziehung von Wissen bei der Lösungsfindung voraus, da die ckkehr zu bereits abgearbeiteten Regeln jederzeit möglich ist; nichtsdestoweniger ist ein rogramm mit einer problemspezifischen Wissensbasis erheblich effizienter. Ein Rücksprung zu inem zuvor markierten Punkt erfolgt immer dann, wenn:

. ein Problemstatus inferiert wird, der bereits durchlaufen wurde
(Vermeidung von Redundanz),
. wenn eine zuvor festgelegte Grenze für die Überprüfung eines Lösungsweges
("depth bound" (72)) erreicht wird,
. wenn innerhalb eines Lösungswegs keine Regeln mehr angewandt werden können,
d.h. ein neuer Lösungsweg eingeschlagen werden muß.

ie Backtrackingstrategie "vergißt" alle Regelsequenzen, die sich als Sackgassen erwiesen haben; only the path currently being extended is stored explicitly"(73).

as "chronological backtracking"(74) tritt dann in Kraft, wenn sich eine Entscheidung im ormalerweise gradlinig vorwärts arbeitenden Suchprogramm als falsch erweist. Mithilfe dieser ethode werden zunächst alle Alternativen, die bei der letzten Entscheidung unberücksichtigt lieben, überprüft, inwieweit sie eine bessere Lösung beinhalten. Falls sich an diesem Punkt eine positive Änderung des status quo ergibt, muß der Suchprozeß solange rückwärtig verfolgt erden, bis sich an einem Entscheidungspunkt (Knotenpunkt im Lösungsbaum) eine brauchbare lternative finden läßt und die rückwärtige Verfolgung des bisherigen Lösungsweges abgelöst werden kann durch die erneut vorwärtsgerichtete Suche nach der endgültigen Lösung. Diese orgehensweise droht ineffektiv zu werden, wenn an den einzelnen Entscheidungsknoten zu viele lternativen überprüft werden müssen. Hier dient der Algorithmus des "dependency-directed acktracking"(76) als Abhilfe. An Stelle der Überprüfung aller Alternativen werden nur die-jenigen untersucht, die in inhaltlicher Abhängigkeit zu dem Punkt stehen, der sich als Sackgasse ntpuppte. Damit verringert sich die Zahl der möglichen Lösungswege auf ein akzeptables Maß. "Thus nonchronological backtracking is an efficient way to find compatible choices as long as there is a way of tracing back over dependencies to find the relevant choice points"(77).

Bei der "graph-search control"(78) werden die Auswirkungen verschiedener Regelanwendungen gleichzeitig gespeichert, um so die Flexibilität der Lösungssuche zu gewährleisten (79). Dieser Kontrollmechanismus erweist sich insbesondere dann als sehr nützlich, wenn die Effekte verschie-

dener Regelsequenzen jederzeit abrufbar bleiben sollen, da bereits verworfene Lösungswege wieder neu aufgenommen werden können, wenn sich die Alternativen als noch schlechter erwiesen haben. Die zu unterscheidenden Richtungen des Schlußfolgerungsprozesses in Produktionssystemen ("forward-chaining and backward-chaining") wurden früher bereits ausführlich dargestellt und sollen hier nur insofern nochmals erwähnt werden, als ihre Bedeutung für die Kontrollsteuerung in Produktionssystemen hervorgehoben werden muß. "Forward- production systems" zeichnen sich dadurch aus, daß relativ präzise Statusbeschreibungen vorliegen, die sich durch die Anwendung von "F-rules"(80) verändern lassen. "Backward-production systems" beinhalten genaue Zielbeschreibungen, die durch "B-rules"(81) in zu absolvierende Unterziele gegliedert werden. Bidirektionale Produktionssysteme beinhalten Kontrollstrukturen, die bei jeder neuen Regelanwendung entscheiden, ob vorwärts- oder rückwärtsverkettet wird.

Nilsson (82) unterscheidet darüberhinaus zwischen "commutative production systems" und der "decomposable production systems". Die erste Gruppe zeichnet sich durch eine generelle Austauschbarkeit aller Regeln aus, d.h. eine Regel kann immer wieder angewandt werden und alle Regeln sind gegeneinander austauschbar, da sie unabhägig von der Reihenfolge ihrer Anwendung zum Ziel führen können. Die durch Regelanwendung erzeugte Datenbasis ist invariant gegenüber Permutationen der Regelreihenfolge. Die zweite Gruppe der "decomposable productionsystems"(83) ist charakterisiert durch eine Aufgliederung der Datenbasis. Zwecks Vermeidung redundanter Problemlöungsprozesse kann die Ausgangsdatenbasis in Einzelaspekte unterteilt und parallel abgearbeitet werden. Voraussetzung ist natürlich die Möglichkeit der Regelanwendung auf diese Einzeldatenbasen. Letztlich hängt es davon ab, wie ein Problem strukturiert ist, ob eine Aufgliederung der Ausgangsdatenbasis erlaubt ist. Insgesamt gesehen bedarf jedes Produktionssystem einer wirksamen Kontrollsteuerung, d.h. es muß ein großes Spektrum an Wissen beinhalten über "processes, strategies, and structures used to coordinate the entire problem-solving process"(84).

Obwohl die Kontrollsteuerung ein elementarer Bestandteil von leistungsfähigen Programmen ist, darf dennoch nicht übersehen werden, daß die Art der Repräsentation eines Problems, die Verankerung von Wissen und die Berücksichtigung möglicher Einschränkungen eines Problemfeldes ebenso relevant sind. "A sophisticated control strategy can make smart procedures smarter, but they cannot make stupid procedures smart"(85).

3.2 Schlußfolgerungen und logische Beweisverfahren

3.2.1 Allgemeine Bemerkungen

Zu den wichtigsten Problemlösungsmethoden innerhalb der KI-Forschung zählen Schlußfolgerungen und logische Ableitungsverfahren. Die Deduktion neuer Fakten aus bekanntem Wissen stellt eine der wesentlichen Grundlagen dar für die Konzeption von wissensbasierten Problemlösungsprogrammen. Die Fähigkeit eines Systems, Fakten zu inferieren, die nicht explizit verankert wurden, wird als "reasoning" bezeichnet; "when the system is required to do something that it has not been explicitly told how to do, it must reason - it must figure out what it needs to know from what it already knows"(86).

Barr und Feigenbaum(87) differenzieren grundsätzlich zwischen verschiedenen Formen der Schlußfolgerung:

1. "Formal reasoning": entspricht einer Deduktion nach streng formalisierten Ableitungsregeln;
2. "Procedural reasoning": vorgegebene Lösungsmuster werden ausgeführt;
3. "Reasoning by analogy": eine auf Analogien basierende Form des Schlußfolgerns (Analogieschluß);
4. "Generalization and abstraction": Schlußfolgerungen werden vollzogen, indem gleiche Grundlagen unterschiedlicher Probleme herausgefunden werden;
5. "Meta-level reasoning": ist die Fähigkeit, den Umfang des eigenen Wissens abschätzen und mit Wissen problemadäquat umgehen zu können (88).

In der Künstlichen Intelligenz nehmen die formalen Ableitungsverfahren notwendigerweise einen besonderen Stellenwert ein, vor allem auch deshalb, weil diese Form der Schlußfolgerung mit Computern am ehesten zu realisieren ist, ganz im Gegensatz beispielsweise zum Analogieschluß. Im Folgenden werden einige logische Beweisverfahren dargestellt, die innerhalb der KI-Forschung bis heute eine wesenliche Rolle spielen.

ogische Beweisverfahren galten lange Zeit innerhalb der KI-Forschung als effiziente, ja sogar usreichende Methode der Problemlösung. Man ging von der Annahme aus, daß diese formalen trategien in den unterschiedlichsten Problembereichen adäquate Verfahren darstellen. "Many nformal tasks, including medical diagnosis and information retrieval, can be formalized as heorem-proving problems"(89). Vorrang hatten zunächst die klassischen Inferenzstrategien, vor llem die Resolutionsmethode, mit der man glaubte, ein breites Spektrum an Problemen lösen zu önnen. Da sich diese Annahme jedoch als falsch erwies, wurden die streng formalen Verfahren rgänzt durch Methoden des ungenauen Schließens (Expertensysteme), durch induktive Inferenz- ethoden (Lernsysteme) und modale Schlußfolgerungsmethoden (natürlichsprachliche Systeme) (90).

ie Ursache für die besondere Präferenz der logischen Beweisverfahren in der KI-Forschung liegt or allem darin, daß die formalen Schlußfolgerungen als gültig begriffen werden können im Sinne er logischen Beweisverfahren. Doch entsprechen die strengen formalen Methoden oftmals weder den rfordernissen, die vage und diffuse Wissensbereiche implizieren, noch beinhalten sie die esonderheiten der menschlichen Problembewältigung, die sich aber in der Praxis oftmals als rheblich effizienter erwiesen. "On the negative side, logic can be a procrustean bed, for oncentrating on logic can lead to concentrating on the mathematics of logic, deflecting ttention away from valuable problem-solving techniques that resist mathematical analysis"(91).

3.2.2 Das Resolutionsverfahren

Wie oben bereits erwähnt, stellt die Resolutionsmethode eine der wichtigsten logischen Beweisverfahren in der KI-Forschung dar. Vor allem durch die Programmiersprache PROLOG hat dieses Verfahren eine weitreichende Bedeutung erlangt. Das grundlegende Prinzip der Resolution ist der Beweis durch Widerspruch, "reductio ad absurdum" (92).
Robinson (93) entwickelte 1965 die Computerimplementation des Resolutionsverfahrens. Ziel des Verfahrens ist die Ableitung einer neuen Tatsache aus bekanntem Wissen, wobei gilt, daß bei wahren Prämissen auch die Schlußfolgerung wahr sein muß. Das Resolutionsverfahren setzt eine formale Umschreibung der zu beweisenden Fakten voraus. Entscheidend ist zunächst, daß ein zu beweisendes Statement in sein Negativum transformiert wird. Die Negation der zu beweisenden Tatsache muß sich im Ableitungsprozeß als falsch erweisen, so daß das ursprüngliche Statement als wahr gelten kann. Der Beweis wird also durch einen Widerspruch geführt, "resolution produces proofs by refutation"(94).

Voraussetzung für die Anwendung des Resolutionskalküls ist das Vorhandensein von sogenannten "Klauseln"; d.h. formallogischen Sätzen, die aus Prädikatenlogischen Ausdrücken (Literalen) zusammengesetzt sind. Um diese Klauseln zu erzielen, müssen Implikationen (wenn = dann - Verknüpfungen) formallogisch umgewandelt werden, wobei die transformierten Klauseln die gleiche Wahrheitswertetabelle wie die Implikation aufweisen müssen. Diese Transformation soll anhand eines Beispiels illustriert werden:
Ausgangsstatement:
Wenn Sokrates ein Mensch ist, dann ist Sokrates sterblich

$$\text{Mensch(Sokrates)} \rightarrow \text{sterblich(Sokrates)}$$

Diese Implikation ergibt durch die geforderte Transformation folgende Klausel-Form:

$$(\text{nicht Sokrates(Mensch)}) \vee \text{sterblich(Sokrates)}$$

Beide Ausdrücke haben die gleichen Wahrheitswertetabellen, so daß diese Transformation nach den syntaktischen Regeln erlaubt ist. "Eliminate $\rightarrow$, using the fact that a $\rightarrow$ b is equivalent to a v b "(95). Semantische Veränderungen bleiben dabei unberücksichtigt und werden nicht reflektiert.

Das Resolutionsverfahren erfordert im Einzelnen folgende Schritte:

1. Transformation der Prämissen in Klauseln
2. Negation des zu beweisenden Statements
3. Bildung neuer Klauseln durch Variablensubstitution; dieser Vorgang wird als "unification" bezeichnet (96). Da der Matching-Prozeß zwischen zwei Klauseln ihre exakte Übereinstimmung voraussetzt, wird durch den "unification"- Algorithmus die mögliche Substitution der Variablen durch Konstante, andere Variablen und Funktionen gewährleistet, um die formalen Bedingungen für die Elimination komplementärer Klausels mit gleichen Prädikaten zu schaffen.

4. Elimination komplementärer Klauseln, d.h. Klauseln mit gleichen Prädikaten; dieser spezielle Schritt wird als Resolution bezeichnet.
5. Reduktion gleicher Konnektionen auf eine einzige Repräsentation, "Factoring"(97) genannt.
6. Wiederholung der Vorgänge 3 - 5, bis eine sogenannte leere Klausel gefunden wurde (Ziel jedes Resolutionsverfahrens), und das zu beweisende Statement als wahr gelten kann. Wird keine leere Klausel als Endresultat gefunden, muß das zu beweisende Statement als ungültig zurückgewiesen werden.

Das entscheidende Prinzip des Resolutionverfahrens ist dabei die Elimination komplementärer Konnektionen(98), d.h. das Löschen sich gegenseitig ausschließender Klauseln auf der Basis der Variablensubstitution. Beispielsweise können die beiden Aussagen: (NOT(MAN(x))) und (MAN(Sokrates)) als komplementäre Konnektionen eliminiert werden, wenn die Variable x durch Sokrates substituiert werden kann. Ziel jeder Resolution ist die leere Klausel, die den Beweis für die Richtigkeit des angenommenen Statements liefert. "Resolution is guaranteed to produce a contradiction if the theorem follows from the axioms"(99).

Während das Resolutionsverfahren für die Aussagenlogik relativ unproblematisch ist, ergeben sich bei der Prädikatenlogik vor allem dort Probleme, wo Quantoren auftreten. Durch Anwendung der SKOLEM-Funktion(100) werden existenzquantifizierte Ausdrücke umgewandelt, z.B.(101):

$\exists$On(x,y) UND NOT(pyramid(y))

wird zu

On(x,Magic(x)) UND NOT(pyramid(Magic(x)))

d.h. die existenzquantifizierte Variable wird spezifiziert, so daß eine Umwandlung in Klausel-Form möglich wird. Universelle Quantoren in der Prädikatenlogik werden gemäß einer Übereinkunft so behandelt, daß alle Variablen als allgemeinquantifiziert betrachtet werden. Nach diesen Transformationsprozessen werden prädikatenlogische Ausdrücke in Klauseln umgewandelt, zur Liste der Klauseln wird die Negation des zu beweisenden Statements addiert, die Literale werden auf das Attribut komplementär hin überprüft und gegebenenfalls eliminiert; Ziel ist wiederum die leere Klausel, die den Beweis für das angenommene Statement liefert.

Das Resolutionsverfahren bietet zwar den Vorteil, daß ein Beweis auf jeden Fall gefunden wird, sofern er existiert, jedoch erweist sich der Prozeß häufig als extrem zeitaufwendig. Zur Abhilfe wurden mehrere Strategien entwickelt, die das Verfahren einschränken.

1. "unit-preference strategy"(102): die Resolutionsmethode wird nur auf die Klauseln mit der kleinsten Anzahl an Literalen angewandt;
2. "set-of-support strategy"(103): das Resolutionsverfahren wird nur bei den Klauseln angewandt, die das negierte Theorem oder dessen Ableitungen beinhalten;
3. "breadth-first strategy"(104): zunächst werden alle möglichen Paare der Anfangsklauseln und erst im zweiten Schritt deren Ableitungen überprüft.

Selbst diese unterstützenden Strategien verhindern nicht, daß sich das Resolutionsverfahren in der Praxis oftmals als äußerst ineffektiv erweist. Der große Zeitaufwand stellt jedoch nicht das einzige Problem dar; so besteht die Gefahr, daß durch die stets notwendige Transformation der prädikatenlogischen Ausdrücke in Klauseln heuristische Informationen verlorengehen (Beispiel: existenz- und allquantifizierte Variablen). Zudem erweist sich das Resolutionsverfahren besonders dann als unbrauchbar, wenn Systeme interaktiv mit dem Benutzer arbeiten, da die Resolutionsmethode schwer durchschaubar ist, die Transparenz der systeminternen Lösung also nicht mehr gewährleistet ist. Die Monotonie des Resolutionskalküls, d.h. die Unbeeinflußbarkeit der Beweise durch Hinzufügung neuer Axiome zu einer Liste von Theoremen, entspricht zudem häufig nicht den Anforderungen der realen Welt; "the monotonicity property is incompatible with some natural ways of thinking"(105). Als ganz wesentlicher Nachteil, der innerhalb der KI-Forschung jedoch oft nicht berücksichtigt wird, ist die rein syntaktische Ausrichtung dieses Beweisverfahrens zu nennen; semantische Aspekte, besonders die semantischen Konsequenzen der formalen Transformationen, werden nicht bedacht. Dennoch erscheint es heute vielen KI-Forschern notwendig, die Anwendung des Resolutionsverfahren auf bestimmte Anwendungsgebiete zu beschränken, die eine Transformation des Wissens in Axiome problemlos zulassen. Die anfängliche Euphorie und die Annahme einer generellen Anwendbarkeit des Resolutionsprinzips sind abgelöst worden durch eine eher realistische Einschätzung: "automatic theorem-proving turned out not to be the magic formula that would solve all AI problems at once" (106). So bemüht man sich mittlerweile um die Entwicklung von Beweisverfahren und Schlußfolgerungsmethoden, die eine stärkere Benutzerorientierung aufweisen, wie z.B. die "natural deduction systems"(107) und die Verfahren der "nonmonotonic logic"(108), die vor allem bei vagem und unsicherem Wissen anwendbar sind.

3.2.3 Die Methode der "Natural Deduction"

Der Begriff "Natural Deduction"(109) ist kein präziser Terminus für ein bestimmtes Beweisverfahren; vielmehr beschreibt er eine "melange of techniques"(110). Das Prinzip von Systemen, die unter dieser Bezeichnung subsumiert werden, liegt in der Determination von Ausgangs- und Zielzustand vor der Beweisführung, wobei Ableitungsverfahren benutzt werden, "that mimic the reasoning of human theorem-provers"(111). Die ständige Interaktion zwischen Benutzer und System ermöglicht die stete Einflußnahme des Menschen auf die Form der Beweisführung. Basis der Ableitungsverfahren ist die Aufgliederung eines Ziels in Unterziele. Die Unterziele werden im Matchingprozeß daraufhin überprüft, ob es für die jeweils unbekannten Variablen Substitutionsinstanzen gibt. Zur Illustration folgendes Beispiel:

Ausgangsbedingungen:
(Amerikaner(Fred)) UND (Amerikaner(x))
→ (sportbegeistert(x))

Ziel:
→ (sportbegeistert(Fred))

Durch Substitution von x durch Fred kann leicht der Beweis geführt werden, daß Fred, da er Amerikaner ist, auch sportbegeistert ist. Durch das Prinzip des natural deduction, Ziele in Unterziele aufzugliedern, ist der Beweisprozeß dem menschlichen Denken näher als das Resolutionsverfahren. Heuristische Informationen werden in das Beweisverfahren integriert, indem spezielle Prozeduren über die Richtung der Beweisführung Auskunft geben. Damit wird nicht nur der Beweisprozeß beschleunigt, sondern darüberhinaus ist der Vorgang für den menschlichen Benutzer erheblich verständlicher. Die Methoden der natürlichen Deduktion sind noch in der Entwicklung begriffen und kaum als eigenständiges Gebiet abgrenzbar, so daß m Rahmen dieser Darstellung nicht näher darauf eingegangen werden kann.

3.2.4 Nonmonotonic logic

Viele KI-Systeme zielen auf Problemlösungen in Bereichen, die eine vollständige und widerspruchsfreie Repräsentation von Wissen nicht zulassen. Tatsaechlich sind die meisten Problemgebiete gekennzeichnet durch ein hohes Maß an unsicheren Fakten, Wahrscheinlichkeiten, Überzeugungen und Annahmen. Der Umgang mit unvollständigen Informationen, sich ändernden Zuständen oder Situationen und die Notwendigkeit, vorläufige Hypothesen in den Problemlösungsprozeß zu integrieren, führen dazu, daß die klassischen Beweismethoden der formalen Logik in diesen Bereichen nicht anwendbar sind. So bemüht man sich innerhalb der KI-Forschung seit längerem, die strengen logischen Beweisverfahren diesen Erfordernissen anzugleichen; "Purely deductive reasoning techniques have long been recognized as inadequate for capturing all intelligent thought"(112).

Verschiedene Verfahren wurden entwickelt, die auf die Berücksichtigung von vagem Wissen im Problemlosungsprozeß zielen. Einige dieser Strategien werden im Folgenden dargestellt.

Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich immer dann, wenn Wissen auf Überzeugungen basiert, d.h. nicht als gültig im Sinne formaler Kriterien begriffen werden kann. Die Methode der "possible-world semantics"(113) stellt eine Möglichkeit dar, mit Annahmen oder Uberzeugungen (durch die Begriffe "believe" and "know" als solche gekennzeichnet) umzugehen. Man versucht hier zunächst, diejenigen Fakten und Ereignisse zu bestimmen, die mit den jeweiligen Überzeugungen kompatibel sind und schafft so eine Faktenbasis, die in sich konsistent ist, obwohl sie insgesamt gesehen von einer Annahme abhängt. In dieser "Scheinwelt" können die prädikatenlogischen Inferenzstrategien angewandt werden, da die künstlich geschaffenen Kriterien der Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit dies nunmehr erlauben.

Eine weitaus bedeutungsvollere Methode des Umgangs mit unsicherem Wissen ist jedoch die nichtmonotone Logik. Hier versucht man der menschlichen Fähigkeit Rechnung zu tragen, nach der nichtmonotone Schlüsse gezogen werden, d.h. Schlußfolgerungen getätigt werden, die bei neuen, widersprechenden Ereignissen widerrufen werden. Im Gegensatz zur monotonen Logik, wo die Addition neuer Axiome das Theorengefüge nicht verändern kann, ist in der nichtmonotonen Logik die Beeinflußung der Inferenzen durch neu hinzugekommene Fakten berücksichtigt worden.

Zwei Methoden des "nonmonotonic reasoning"(114) sollen hier vorgestellt werden: "reasoning by default" und "reasoning by circumscription" (115).
Die Methode des "reasoning by circumscription" wurde von McCarthy (116)entwickelt. Die Grundlage dieser Strategie besteht darin, daß eine Konvention getroffen wird, nach der nur diejenigen

Fakten als relevant für einen Problembereich gelten, die auch explizit erwähnt sind, d.h. e handelt sich um eine sogenannte "closed-world assumption"(117). Andere als die genau bekannte Fakten und Zusammenhänge bleiben unberücksichtigt, existieren also in diesem Modell nicht. Zu Illustration diene folgendes Beispiel: Man nehme an, daß eine einzige Person mit roten Haare bekannt ist: Judith. Tritt nun irgendwo eine Person mit roten Haaren auf, so wird mit de Methode des "reasoning by circumscription" der Schluß gezogen, daß es sich bei dieser Person u. Judith handelt. Dieses Wissen wird formalisiert durch:
Für alle x gilt:
(x=Judith —➧ (rothaarig(x))
Daraus folgt:
Für alle x gilt:
(rothaarig(x) —➧ x = Judith)

Das bisherige Wissen wird nun ergänzt durch die Kenntnis über eine andere Person, die ebenfall rothaarig ist. Entsprechend der Methode wird die bisherige Wissensbasis um genau diesen neue Tatbestand erweitert. Die Formalisierung sähe dann so aus:
Für alle x gilt:
(rothaarig(x) —➧ x = Judith ODER x = Jennifer).

Diese Beispiele verdeutlichen die zugrundeliegende Annahme dieser Methode, nach der davo ausgegangen wird, daß es zulässig ist, jeweils nur die explizit bekannten Fakten eines Problem bereichs im Schlußfolgerungsprozeß zu berücksichtigen, um die formalen Strategien anwenden z können. Dabei wird nicht bedacht, daß eine künstliche Einschränkung von Fakten, wie sie durch das Mikrowelt- konzept vorgenommen wird, zu einem verzerrten Abbild der Realität bzw. de Wissens über die Realität führt, die zu falschen, d.h. syntaktisch zwar korrekten, semantisch aber fehlerhaften Schlüssen führen kann.

Eine weitere Methode, die unter dem Oberbegriff der nichtmonotonen Logik subsummiert wird, is das sogenannte "default reasoning" (118). Dieser Bezeichnung umschreibt eine Vorgehensweise, be der Annahmen über Fakten so lange als wahr gelten, bis sie durch neue Erkenntnisse revidier werden; "Defaults" sind also Statements oder Regeln, die Wahrscheinlichkeiten, Normen ode allgemeine Ausprägungen repräsentieren (siehe auch "default-slots" bei Frames). "Default S as S is provable unless and until S can be disproved"(119). Objekte und Ereignisse, deren Ausprä gungen nicht mit letzter Sicherheit bekannt sind, werden also repräsentiert, indem jeweils die wahrscheinlichsten Merkmale als "Defaults" gespeichert werden ("the most probable choice"(120)). Die Werte gelten so lange als zutreffend, bis ein Widerspruch erfolgt. Solange dies nicht der Fall ist, können formallogische Strategien angewandt werden, da situativ von einer widerspruchs freien und vollständigen Faktenkollektion ausgegangen wird. Um eine Wissensbasis, die auf Wahrscheinlichkeiten oder Annahmen basiert, so zu gestalten, daß mögliche Negationen vor Annahmen berücksichtigt werden, muß in das System ein "dependency-directed-backtracking" - Mechanismus integriert sein. Diese Strategie erlaubt nicht nur die Neuformulierung von Annahmen, die mit den neuen Fakten in Widerspruch geraten sind, sondern gewährleistet zudem die Revision der Ableitungen, die von den ungültigen Fakten abhängen. "It is often necessary, when one statement is deleted from the knowledge base, to go back over other statements whose proofs depend on the deleted statement and either eliminate them or find new proofs that are valid with respect to the current knowledge base"(121). Die Elimination einer einzelnen Tatsache kann einen signifikanten Effekt auf die gesamte Wissensbasis haben; dieser Umstand muß in entsprechenden Systemen berücksichtigt werden.
Als Beispiel für ein derartiges KI-System dient das von Doyle entwickelte "Truth Maintenance System (TMS)" (122). Es handelt sich um ein Programm, daß in unterschiedliche Problemlösungs systeme integriert werden kann, um nichtmonotone Schlußfolgerungen in diesen Systemen zu ermöglichen und aufgetretene Inkonsistenzen der Wissensbasen zu beseitigen. "When an inconsistency is detected, it evokes its own reasoning mechanisms, dependency-directed back tracking, to resolve the inconsistency by altering a minimal set of beliefs" (123).
Das "Truth Maintenance System" repräsentiert jedes Statement oder jede Regel in Form eines Knotens, der in einem von zwei möglichen Stadien sein kann: "IN" oder "OUT"(124) Das Stadium "IN" kennzeichnet eine Liste von sogenannten "justifications" (125), die validen Bedingungen entsprechen, unter denen das Statement des jeweiligen Knotens gültig ist. "These justifications make it easy to deal with withdrawn assump-tions"(126). Das Stadium "OUT" beschreibt eine Liste von verworfenen Annahmen, die in dem Augenblick wieder aufgerufen werden können, wenn erneut Informationen zu einer Revision bereits vollzogener Ableitungen führen und die verworfenen Annahmen wieder überprüft werden können, ohne daß eine vollständige Neugenerierung der Lösungs wege nötig ist.

; existieren zwei unterschiedliche Formen von Justifications im Truth Maintenance System:
- die "Support List" (SL),
- der "Conditional Proof" (CL)(127).

.t Hilfe der Support List können Abhängikeiten zwischen Fakten verdeutlicht werden. Z.B.: ist .e Validität der Tatsache (2) "es ist kalt" abhängig von der Tatsache (1) "es ist Winter". Wenn l) zutreffend ist, dann ist (2) solange auch gültig, bis (1) zurückgewiesen wird durch eine .idersprechende Information. Wird (1) abgelehnt, so wird unmittelbar auch (2) als von (1) ɔhängige Tatsache revidiert. In den Support Lists können nicht nur sogenannte "IN"-Knoten .nthalten sein, sondern auch "OUT"- Knoten, die festlegen, welche Tatsache mit dem entsprechen-.en Knoten inkompatible ist; z.B.:

noten:	SL	"IN"	"OUT"
1) "es ist winter"	SL	( )	( )
2) "es ist kalt"	SL	(1)	(3)
3) "es ist warm"	SL	( )	(2,1)

iese Formalstruktur beinhaltet: wenn es kalt ist, ist es winter und es ist nicht warm, bzw. enn es warm ist, ist kein winter und es ist nicht kalt.

'ird nun Knoten (1) als inkompatibel mit den aktuellen Daten evaluiert, d.h. kommt etwa die nformation "es ist Sommer", wird sowohl Knoten (1) als auch Knoten (2) als unzutreffend bgelehnt ("OUT"-gesetzt). Anstelle der bislang gültigen Knoten werden neue Annahmen gemacht, ie nun die "Default"-Werte der neuen Wissensbasis bilden und die solange gelten, bis erneut nkonsistenzen auftreten. Die "Conditional Proof"-Knoten enthalten Hypothesen, die zur Verein-achung des Schlußfolgerungsprozesses wie "Support Lists" gehandhabt werden.

)as Prinzip des "default reasoning" versucht damit, die spezifische Form menschlichen Denkens zu erücksichtigen, von Überzeugungen auszugehen und diese bei widersprechenden Informationen zu evidieren. Mithilfe des "Truth Maintenance Systems" ist es möglich, Schlußfolgerungen auch in Bereichen zu ziehen, die lediglich wahrscheinliches Wissen repräsentieren. Neue, inkompatible Fakten bewirken eine Revision gezogener Schlüsse und setzen neue Annahmen an die Stelle der nun ungültigen Fakten. Damit wird die menschlichen Denkweise, ("we discard old conclusions in favor of new evi-dence")(128) zumindest ansatzweise nachgeahmt.

Insgesamt gesehen ist die Implementation nichtmonotoner Schlußfolgerungssysteme in folgenden Gebieten unerläßlich:
- in Bereichen mit unvollständigen Informationen,
- bei sich rasch wandelnden Datenbasen
- bei Problemlösungssystemen, die temporäre Annahmen über Teillösungen erfordern.

Insgesamt betrachtet ist der Bereich des "nonmonitonic reasoning" noch im Anfangsstadium. Es bleibt also abzuwarten, ob die bislang unbefriedigenden Versuche zum Umgang mit vagem Wissen ergänzt werden durch neue, suffizientere Strategien oder ob es letztlich unmöglich sein wird, menschliche Überzeugungen in Computersystemen zu repräsentieren.

3.3 "Statistical" und "probabilistical Reasoning"

Wie bereits deutlich wurde, beinhalten viele Anwendungsgebiete der Künstlichen Intelligenz unsicheres oder unvollständiges Wissen; ("we might know something that is probably true")(129). Bereiche mit wahrscheinlichem Wissen sind Problemfelder, in denen Eigenschaften zufallsverteilt sind und/oder Tatsachen aufgrund nichtvollständiger Daten statistisch betrachtet werden müssen. Hier ist die Implementation wahrscheinlichkeitsorientierter Schlußfolgerungsstrategien unumgänglich.

Die mathematische Wahrscheinlichkeitstheorie bietet Möglichkeiten zur Formalisierung unsicheren Wissens. Unsichere Ereignisse können durch Zuweisung eines Wahrscheinlichkeitswertes p(A) determiniert werden; kombinierte Wahrscheinlichkeiten sind durch Verknüpfungen von Einzelwahrscheinlichkeiten darstellbar:

$$\text{prob (A und B)} = p(A) * p(B).$$

Eine besonders häufig angewandte statistische Formel ist das Bayes-Theorem; die Formel lautet:

$$p(Hi:E) = \frac{p(E:Hi)*P(Hi)}{\sum_{n} p(E:Hn)*P(Hn)}$$

Mit Hilfe dieses Theorems lassen sich bedingte Wahrscheinlichkeiten ausdrücken, d.h. Ereignisse deren Wahrscheinlichkeit von dem Auftreten bzw. der Wahrscheinlichkeit eines anderen Ereignisses abhängt.

Die Integration von Wahrscheinlichkeiten in den Problemlösungsprozeß ist gerade für die wissenschaftliche und analytische Anwendung von KI-Systemen von enormer Wichtigkeit; "Often the solution of completely deterministic problems requires probabilistic techniques because at each step of the problem-solving process there is not enough information available to enable us to predict the outcome with certainty"(130).

Informationen, denen Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet sind, dienen der Heuristik eines Problemlösungssystems. Die Wahrscheinlichkeit einer Information wird häufig nicht als numerischer Wert in der Wissensbasis verankert, sondern wird z.B. in Produktionssystemen durch die Rangordnung der Regeln determiniert, d.h. durch die Festlegung, welche Regel zuerst benutzt werden soll. In anderen Fällen ist die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses eingegliedert in die heuristische Funktion, die einen individuellen Knoten evaluiert.

Häufig erfordern Problemlösungen eine größere Anzahl möglicher Schlußfolgerungen, um zwischen verschiedenen Lösungen entscheiden zu können(131). Dabei werden die einzelnen Schlußfolgerungen entsprechend der Wahrscheinlichkeit ihrer Gültigkeit geordnet. Für jede mögliche Ableitung wird entweder eine heuristische Funktion instantiiert oder aber eine Summation der Einzelwahrscheinlichkeiten vorgenommen. Ein wahrscheinlichkeitsorientiertes Regelsystem, in dem jeder Regel ein bestimmter Wahrscheinlichkeitswert zugeordnet ist, stellt ein solches System dar. Die Wahrscheinlichkeitsfaktoren beziehen sich dabei sowohl auf die Bedingungen von Regeln als auch auf die Schlußfolgerungen, wobei letztere von der Wahrscheinlichkeit der Prämissen unmittelbar abhängen. Die Regeln können zudem miteinander verbunden werden, entweder durch Anwendung der einfachen Wahrscheinlichkeitstheorie für unabhängige Ereignisse oder durch das Bayes-Theorem für bedingte Wahrscheinlichkeiten. Die elementare Wichtigkeit dieser Art des Schlußfolgerns hebt Rich (133) hervor; sie betrachtet diese Systeme "as a way of representing the probabilistic information that we need to use as heuristics to guide our search in deterministic situations in which we have incomplete information".

Eines der wichtigsten Konzepte für die Implementation von Wahrscheinlichkeiten in Regelsystemen sind die Sicherheitsfaktoren. Die Sicherheitsfaktoren ("certainty factors" (134)) sind numerische Werte, die zwischen 0 (= falsch) und 1 (=wahr) oder -1 und +1 rangieren. Jeder Aussage in einem Regelsystem wird ein Sicherheitswert zugewiesen. Da jedoch die Bedingungsteile einer Regel immer aus mehreren Aussagen zusammengesetzt sind, müssen Kriterien formuliert werden, wie die Gesamtsicherheit eines Bedingungsteils gebildet wird. Die sogenannte "Ad-hoc-procedure"(135) setzt den geringsten Sicherheitsfaktor eines Regelbedingungsteils als Gesamtsicherheit fest:

a = .9
b = .5
c = 1.0
d = 1.0 ⟶ .5 = input certainty

Dieser Sicherheitsfaktor des Bedingungsteils, als "input certainty"(136) bezeichnet, wird durch einen weiteren Faktor, den sogenannten "attenuation factor"(137) ergänzt, einen Faktor, der die Wahrscheinlichkeit der Regelverknüpfungen beinhaltet. Durch die Multiplikation des "attenuation factors" mit dem "input certainty"-Wert wird der Sicherheitsfaktor für die Schlußfolgerung einer Regel festgelegt, die als "output certainty" bezeichnet wird. Der Verminderungsfaktor soll die Sicherheitsreduktion durch den Schlußfolgerungsvorgang berücksichtigen, er rangiert ebenfalls zwischen den Werten 0 und

1. Dieser Umgang mit ungenauem Wissen, der auf kein theoretisches Konzept wie etwa die Wahrscheinlichkeitstheorie zurückgreift, wird auch von zahlreichen KI-Forschern mit Skepsis betrachtet: "Many consider these computations inappropriate in view of the violence they do to elementary probability theory"(138).

Mithilfe von Wahrscheinlichkeitsfaktoren wird nicht nur unpräzises Wissen zu fassen versucht, sondern darüberhinaus besteht auch die Möglichkeit, Vorab-Schätzungen für Tatsachen abzugeben, von denen man noch keine Kenntnis hat. "A before-analysis estimate, called an a priori value, is a statment about what the certainty is in absence of any knowledge about the particular case in hand"(139). Kommen Informationen hinzu, die für diese Tatsache sprechen, so wird die apriori-Wahrscheinlichkeit entsprechend erhöht.

hrere Punkte scheinen bei der Implementation von Sicherheitsfaktoren problematisch:

Wie läßt sich eine möglichst präzise Transformation sprachlich vager Ausdrücke in numerische Werte realisieren?
Wie kann eine Standardisierung der individuellen Sicherheits- bzw. Unsicherheitsskalen verwirklicht werden?
In welchem Ausmaß sollen minimale Veränderungen bei den Sicherheits-Werten, die sich aufgrund neuer Bedingungen ergeben, berücksichtigt werden?
Wie kann ein Feedback zur Datenbasis zwecks steter Aktualisierung und Neuüberprüfung der CF-Werte von Regeln verwirklicht werden?
Wie lassen sich Wahrscheinlichkeiten von assoziierten Ereignissen darstellen (Verknüpfung nicht unabhängiger Ereignisse ohne Verfälschung des Resultats)?
Wie lassen sich Bedeutung und Interpretation von Wahrscheinlichkeiten determinieren, d.h. inwieweit entsprechen numerische Werte Zufälligkeiten oder Unsicherheiten?
Wie läßt sich die Beeinflussung von Gesamtwahrscheinlichkeiten bei Änderung einer Einzelwahrscheinlichkeit determinieren?

iese hier angesprochenen Probleme sind zum größten Teil noch ungelöst. Innerhalb der I-Forschung bemüht man sich, neue Konzepte für den Umgang mit Wahrscheinlichkeiten zu entickeln, die plausiblere Lösungen beinhalten als die oben Genannten. Generell kann man sagen, aß eine genaue Analyse des Problemfeldes mit Gewinnung präziser Daten der Anwendung von ahrscheinlichkeitswerten stets vorzuziehen ist. Falls die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitserten jedoch unvermeidlich ist, sollten diese unmittelbar den Ereignissen zugeordnet werden, so aß sich keine Fehler durch die Implementation von Globalwahrscheinlichkeiten ergeben. Dennoch leibt das Feld des "probabilistic reasoning" problematisch, wie illustrativ an folgendem Zitat nläßlich des SGAICO-Tutorials 1985 deutlich wird, wo John Fox die Meinung vertrat, "daß es mehr ysteme gibt, die auf irgendeine Art und Weise Wissen über Wahrscheinlichkeiten handhaben, als s Leute gibt, die fundiert erklären können, was das wirklich bedeutet"(140).

4.1 Allgemeiner Überblick

4.1.1 Einleitende Bemerkungen

Expertensysteme, auch als "knowledge-based systems" (1) bezeichnet, wurden im Rahmen des KI-Forschungsbereichs "knowledge engineering" (2) entwickelt und gewinnen zunehmend an Bedeutung. Ein Expertensystem läßt sich charakterisieren als Programm, das einerseits über detailliertes Wissen eines spezifischen Gebietes verfügt und andererseits Inferenzmechanismen besitzt, die einen benutzerunabhängigen Umgang mit diesem Wissen ermöglichen. Dabei werden Problemlösungen realisiert, die mit der Kompetenz menschlicher Experten vergleichbar sind. Expertensysteme gehören zu den wenigen Resultaten der KI-Forschung, die außerhalb der Forschungsinstitute praktisch angewandt werden.

Die Zielsetzung, durch diese Systeme das Wissen von Experten für die Allgemeinheit verfügbar zu machen, stieß auf reges Interesse in der Öffentlichkeit, zumal die anfänglichen Ergebnisse, d.h. die Prototypen wie MYCIN, PROSPECTOR und DENDRAL, bereits eine beachtliche Leistungsfähigkeit aufwiesen. Die potentielle Mächtigkeit dieser Systeme, die in der Darstellung und kostengünstigen Verbreitung sehr seltenen und damit sehr teuren Wissens liegt, hat zu einem weltweiten Bemühen um die Weiterentwicklung dieser Programme geführt und eine ständige Ausweitung der Anwendungsbereiche hervorgerufen. Die mit der Entwicklung von Expertensystemen einhergehende Kodifizierung von Wissen wird nach Einschätzung der KI- Forscher weitreichende Bedeutung gewinnen. Wissen wird begriffen als elementarer Bestandteil der menschlichen Kultur und des technologischen Fortschritts, so daß die Verbreitung privaten Expertenwissens durch allgemein zugängliche Computersysteme enorme Wichtigkeit gewinnen wird. Dementsprechend ist die Prognose über die zukünftige Verbreitung von Expertensystemen allgemein sehr positiv; "The next generation of expert systems can be expected to fare well in the commercial marketplace" (3).

Die hier prognostizierte weite Verbreitung von Expertensystemen scheiterte bislang vornehmlich an drei Barrieren, die jedoch in naher Zukunft bereits überwunden sein werden: den zu hohen Kosten für Massenspeicher, die die speicherplatzintensiven Wissensbasen der Expertensysteme verursachen, der mangelnden Verfügbarkeit der Programmiersprache LISP auf den üblichen Betriebssystemen sowie der geringen Anzahl an qualifizierten "knowledge engineers"(4), d. h. Fachleuten, die über die nötige Kompetenz zur Entwicklung von Expertensystemen verfügen. Neben rapide fallenden Preisen für interne und externe Speichermedien, der zunehmenden Zahl von Informatikstudenten im KI-Bereich und der weiten Verbreitung von LISP und mittlerweile auch PROLOG (gerade auch im Bereich der Personal Computer) werden darüberhinaus in der letzten Zeit immer mehr sogenannte "tools" (5) für die Konzeption von Expertensystemen entwickelt, d.h. Softwarepakete, die die angestrebte Transformation des Expertenwissens in die Formalismen der Computersysteme enorm erleichtern (und mit gewissen Einschränkungen den knowledge engineer überflüssig machen).

4.1.2 Zielsetzungen

Die primäre Zielsetzung der Konstrukteure von Expertensystemen ist die kostengünstige Verbreitung privaten Wissens von Experten, deren Expertise nach Meinung der KI-Forscher ohne diese Programme entweder gar nicht oder nur zu extrem hohen Kosten den Interessenten zugänglich gemacht werden könnte. Neben dieser im Vordergrund stehenden Intention streben manche KI-Forscher die Simulation menschlicher Expertentätigkeit an und damit einhergehend Erkenntnisse über menschliches Entscheidungs- und Problemlösungsverhalten. Darüberhinausgehend formulieren einige Forscher die These, man könne mit Hilfe von Expertensystemen Erkenntnisse gewinnen über "Verfahren zur Mechanisierung intellektueller Tätigkeiten" (6).

4.1.3 Charakterisierung des Forschungszweigs "knowledge engineering"

Der Begriff "knowledge engineering" kann wie folgt definiert werden: "We refer to the process of mapping an expert's knowledge into a program's knowledge base as knowledge engineering" (7). Mit dieser Definition wird der Vorgang umschrieben, der zentral für die Konstruktion eines Expertensystems ist: die Transformation des Wissens von Experten in die Wissensbasen von Computerprogrammen. "Knowledge engineering adresses the problem of building skilled computer systems, aiming first at extracting the experts knowledge and then organizing it in an effective implementation" (8). Entsprechend läßt sich das Aufgabenspektrum eines "knowledge engineers" beschreiben:

traktion des Expertenwissens
trukturierung der Performanz und Problemheuristik
ransformation des Expertenwissens in die Formalstruktur
es Computers.

ei stellt vor allem die Extraktion des Expertenwissens eine komplexe, schwer lösbare Aufgabe , da es sich bei der menschlichen Expertise weniger um konkret faßbares Fakten- oder Text- hwissen handelt ("public knowledge" (9)), sondern um die private Problemlösungsheuristik, die h der Experte eines Fachgebietes in jahrelanger Erfahrung angeeignet hat. "This private wledge consists largely of rules of thumb that have come to be called heuristics" (10). Schon Verbalisierung dieser Kompetenz durch den Experten erweist sich als schwierig, da das ertenwissen eher durch empirische Assoziationen gekennzeichnet zu sein scheint als durch klar ukturierbare Tatsachen. Hayes-Roth, Lenat und Waterman(11) charakterisieren dieses Wissen als trukturierte Ansammlung von Heuristiken, "lying like an unmined and unrefined substance". ch eine detaillierte Darstellung der individuellen Vorgehensweise seitens des Experten und itinuierliche Rückfragen des "knowledge engineers" wird versucht, sukzessive die private ertise in eine strukturierte Form zu bringen. "The heuristic knowledge is hardest to get at ause experts - or anyone else - rarely have the self- awareness to recognize what it is"(12). muß also berücksichtigt werden, daß das zu extrahierende Wissen des Experten diesem oftmals r nicht bewußt ist: "He knows more than he is aware of knowing" (13). Dennoch nimmt man erhalb der KI-Forsachung an, daß sorgfältige und präzisierende Fragen hinreichten, um auch s unbewußte Wissen zu extrahieren und damit ein vollständiges Abbild der spezifischen Exper- se zu ermitteln sei. Auf dieser Grundlage nun bemüht sich der Computerexperte um die Transfor- tion dieses Wissens in vorgegebene oder neukonzipierte formale Repräsentationsstrukturen. bei stehen dem "knowledge engineer" bereits entwickelte Softwarepakete "tools" (14) zur nzipierung von Expertensystemen zur Verfügung, die als "leere" Regel- und Inferenzsysteme zeichnet werden, d.h. die die formalen Strukturen beinhalten, auf deren Basis die Repräsenta- on von Wissen und die Verankerung fachspezifischer Problemlösungsstrategien stattfinden kann. e ständige Interaktion zwischen Fachexperten und Computerspezialisten und ein wiederholtes proben der erstellten Programme gewährleiste, so die KI-Forscher, eine ausreichend genaue rstellung der privaten Expertise.

r Abgrenzung der Expertensysteme gegenüber anderen wissensbasierten Computerprogrammen bemüht n sich innerhalb dieses Forschungszweiges um eine Präzisierung des Begriffs "Experte". So wird ie Auffassung vertreten, daß die hochqualifizierte Ausführung einer Aufgabe alleine nicht inreiche, um eine Tätigkeit als Expertentätigkeit zu kennzeichnen; stattdessen ließe sich, so rachman und Amarel (15) menschliche Expertise durch folgende Faktoren charakterisieren:

qualitativ hohes Niveau der Aufgabenbewältigung
Schnelligkeit bei der Lösungsfindung (d.h. Eingrenzung des Suchraums bei Problemlösungen durch anwendbare Regeln und Operatoren)
Spezialisierung auf ein engbegrenztes Problemgebiet ("specialisation and expertness go hand in hand")
fundamentale Kenntnisse über Problemumfeld, Grundlagenwissen Hayes-Roth (16) ergänzt diese Beschreibung durch weitere Charakteristika der Expertentätigkeit:
- Hypothesenbildung bei Problemlösungen auf der Grundlage heuristischen Wissens
- Einschätzung der Güte von Lösungswegen
- Fähigkeit, effektiv mit unsicherem und unvollständigem Wissen umzugehen.

1.1.4 Gütekriterien von Expertensystemen

Die oben aufgeführten Merkmale für die Qualität der Expertentätigkeit dienen den KI-Forschern als Grundlage für die Konzeption von Expertensystemen. Diese Kriterien gelten als Maßstab für die Güte eines Systems, d.h. ein Expertensystem sollte möglichst alle der aufgeführten Fähigkei- ten besitzen. Entsprechend werden die realen bzw. angestrebten Fähigkeiten von Expertensystemen beschrieben(17):

- sie führen schwierige Aufgaben auf Expertenniveau durch,
- sie verfügen über fachspezifische Problemlösungsmethoden, die ihnen einen intelligenten Umgang mit der systeminternen Wissensbasis ermöglichen,
- sie besitzen Kenntnisse über ihre Schlußfolgerungen, d.h. können dem Benutzer ihre Lösungen erklären und den eingeschlagenen Weg rechtfertigen,
- sie lösen die unterschiedlichsten Probleme: Interpretation, Diagnose, Voraussage, Fehlersuche, Design, Planung, Ausbildung, Reparatur und Kontrolle.

Die Maßstäbe, die für die Konstruktion eines Expertensystems innerhalb der Forschung festgelegt werden, bedürfen weiterer Erklärung. Im Zentrum der Anforderungen, die für Expertensysteme formuliert werden, stehen die Fähigkeiten eines Systems, die der Kompetenz eines menschlichen Experten entsprechen sollen. "The most important goal in expert system work is to attain the high level of performance that a human expert achieves in some task" (19). Um diese Zielsetzung zu erreichen, ist es notwendig, die langjährige Erfahrung wirklicher Experten eines Faches ebenso zu berücksichtigen wie dabei erworbene Tricks und unorthodoxe Mechanismen der Problemlösung. Dabei gilt als Grundlage der Bewertung eines Systems sowohl die Richtigkeit der Antwort als auch die Schnelligkeit der Aufgabenbewältigung. In vielen Gebieten, in denen Expertensysteme konzipiert werden, z.B. in der Medizin, ist jedoch nicht nur eine Antwort richtig, sondern mehrere Schlüsse können in vager Hinsicht Gültigkeit beanspruchen. Dies wirft das Problem auf, bislang subjektiv vollzogene Abschätzungen in die Expertenprogramme zu integrieren, d.h. diejenige Lösung zu identifizieren, die am ehesten dem individuellen Fall angemessen ist. "It is only in the strongly technical domains that systems may easily be compared in terms of their success or failure on particular problems" (20). Weiter soll der Umstand berücksichtigt werden, daß die Effektivität von Expertenverhalten vornehmlich auf der ad hoc vollzogenen Elimination als unnütz erkannter Lösungswege basiert. "In particular the quality true experts seem to possess that laymen do not is an ability to recognize large-scale patterns and jump quickly to reasonable hypotheses" (21). Man bemüht sich darum, diese Fähigkeit in die Programme zu implementieren.

Weitere wesentliche Kriterien für die Güte eines Systems sind folgende:

- die Wahl einer adäquaten Repräsentationsstruktur für das fachspezifische Expertenwissen;
- die Implementation möglichst genereller, d.h. auf verschiedene Probleme anwendbarer Strategien zur Problemlösung;
- die ausreichende Komplexität der zu lösenden Aufgaben, insbesondere die Präsenz verschiedener Alternativen an einem Entscheidungspunkt;
- die Transparenz des systemintern vollzogenen Lösungswegs, d.h. die Fähigkeit, gegenüber dem Benutzer die gefällten Entscheidungen rechtfertigen zu können.

In den folgenden Kapiteln wird versucht, diese Kriterien anhand real existierender Systeme zu verdeutlichen und zu überprüfen, inwieweit die bisherigen Resultate diesen Ansprüchen genügen können.

4.1.5 Historische Entwicklung von Expertensystemen

Die Entwicklung von Expertensystemen steht in engem Zusammenhang mit dem Paradigmenwechsel innerhalb der KI-Forschung, d.h. der Neuorientierung an wissensbasierten Systemen. Feigenbaum(22) vertrat als einer der ersten die Auffassung, daß die Implementation von Wissen die Grundlage für die Konzeption von intelligenten Systemen sei. Anläßlich der ersten öffentlichen Darstellung des DENDRAL-Projektes forderte er den Entwurf wissensbasierter Systeme ("knowledge-based systems"), indem er auf die Schwächen früherer Programme verwies; "general problem- solvers are too weak to be used as the basis for building high-performance systems. The behavior of the best general problem-solvers we know, human problem-solvers, is observed to be weak and shallow, except in the areas in which the human problem-solver is a specialist. And it is observed that the transfer of expertise between speciality areas is slight."..."In this view, the expert is the specialist, with a specialist's knowledge of his area and a specialist's methods and heuristics" (24).

Die Enstehung des Forschungszweiges "knowledge engineering" innerhalb der KI-Forschung und die damit einhergehende Konstruktion von Expertensystemen begann Mitte der sechziger Jahre mit der Entwicklung des Systems DENDRAL. Doch wird als eigentliche Geburtsstunde von Expertensystemen erst die "International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) " im Jahre 1977 in Cambridge Massachusetts gewertet, bei der Feigenbaum (25) einen Vortrag über die Relevanz und den Stellenwert von Expertensystemen hielt. Erman (26) unterteilt dennoch die Entwicklung von Expertensystemen in vier Phasen:

1. Entdeckung: (1965 - 1970)
   DENDRAL, MACSYMA
2. Prototypen-Systeme: (1970 - 1975)
   MYCIN, HEARSAY-II, PROSPECTOR

rprobung der Systeme: (1975 - 1981)
UFF, GUIDON, SACON, HASP, INTERNIST
ndustrielle Anwendung: (1981 -
1, DRILLING ADVISOR, DEX-C3

aus dieser Tabelle ersichtlich wird, gelten die Systeme DENDRAL und MACSYMA als die ersten ensbasierten Systeme, die jedoch eher Vorläufer der späteren Expertensysteme darstellen, als sie bereits unter diesen Begriff zu subsumieren wären. Erst in der darauf folgenden Phase standen die Systeme, die auch heute noch als die Prototypen eines Expertensystems gelten, ei das Programm MYCIN hier eindeutigen Vorrang besitzt und von Newell (27) als "granddaddy of ert systems" bezeichnet wird. Diese prototypischen Systeme enthielten nicht nur einheitliche men zur Wissensrepräsentation, sondern auch Kontrollstrukturen und gebietsspezifische blemheuristiken, die den Programmen eine effiziente Problemlösung mit dem Standard eines schlichen Experten ermöglichten. Auf der Grundlage dieser ersten Systeme wurden bzw. werden h heute noch die sogenannten "Tools" konzipiert, die als Fundament weiterer Programme gier(t)en. So basieren beispielsweise die Programme GUIDON und PUFF auf dem aus MYCIN wickelten Tool EMYCIN (= "empty Mycin").

Phase der Erprobung diente der Überprüfung, ob sich die Systeme, die sich in den KI-Laboraien als effizient erwiesen hatten, auch in der Realität bewähren würden. Man versuchte, ohl die Akzeptanz von Expertensystemen bei den Benutzern (etwa Ärzten) zu testen, als auch Güte der systemintern vollzogenen Problemlösungen im Alltag zu überprüfen. Die von den grammen erzielten Resultate wurden den Expertenurteilen gegenübergestellt und stimmten mit sen in vielen Fällen überein. Dagegen stellt die Akzeptanz beim Benutzer auch heute noch ein m gelöstes Problem dar.

letzte, bei weitem noch nicht abgeschlossene Entwicklungsphase dient der industriellen wendung, womit eines der ursprünglichen Ziele der KI-Forscher realisiert werden konnte. In ger Kooperation mit der Industrie wurden zwei Systeme geschaffen, die bereits in routinemäßir Benutzung sind (R1 und DRILLING ADVISOR) und die als Maßstab dienen für die mögliche wendung von Expertensystemen außerhalb der Forschungszentren. Die Bemühungen auch europäischer rmen wie beispielsweise Ford in Zusammenarbeit mit der GMD (DEX-C3) weisen auf einen Trend, r gekennzeichnet ist durch eine steigende Anzahl von Expertensystemen, die direkt für die rtschaftliche Anwendung konzipiert werden und die den zuvor beschriebenen Thesen über die künftige Verbreitung von Expertensystemen entsprechen.

1.6 Struktur eines Expertensystems

e Grundlage eines jeden Expertensystems ist die Wissensbasis. Nur durch die Implementation glichst umfangreichen Wissens über das jeweilige Problemgebiet vermag ein System die Probleme r entsprechenden Domäne zu lösen; "Performance of an expert system depends primarily on the ze and quality of its knowledge" (28). Zusätzlich jedoch ist die Verankerung von problemspezischen Methoden zur Aufgabenbewältigung notwendig, um dem Expertensystem den Umgang mit espeichertem Wissen zu ermöglichen. Als drittes unabdingbar notwendiges Element ist die enutzerschnittstelle zu nennen, d.h. ein Modul, mit dem die Kommunikation zwischen Benutzer und xpertensystem zwecks Eingabe konkreter Daten gewährleistet wird. Wissensbasis, Problemlösungsechanismen (auch als "Inference engine" (29) bezeichnet) und Benutzerschnittstelle bilden damit ie notwendigen Elemente eines jeden Expertensystems. Darüberhinaus jedoch kann ein System über erschiedene andere Module verfügen. So entwirft Hayes Roth(30) die Struktur eins idealen xpertensystems, das folgende Module enthalten sollte:

. einen Sprachprozessor, der die Interaktion zwischen Benutzer und System steuert; mithilfe ieses Moduls ist eine Kommunikation in "usually some restricted variant of English" (31) öglich. Die Sprachprozessoren beinhalten Techniken, mit deren Hilfe Fragen, Antworten, Erklärungen und Anweisungen in natürlicher Sprache an den Benutzer formuliert werden können, die edoch darüberhinausgehend über keine Sprachfähigkeit verfügen.

. einen dynamischer Datenspeicher, etwa eine sogenannte "blackboard" (siehe HEARSAY II) oder ine "agenda" (32), in der die aktuellen Daten während eines Problemlösungsvorgangs gespeichert erden. In diesem dynamischen Datenspeicher werden zudem Zwischenlösungen bzw. die intern ezogenen Schlußfolgerungen eines bestimmten Problemfalls verankert. Zusätzlich können hier eitere Komponenten aufgelistet werden: aktuelle Pläne, wie ein Problem angegangen werden muß, ie Repräsentation von Problemstadien im Verlauf eines Prozesses, die Hypothesenbildung und die

Determination der besten Hypothese, die nach der Abfrage der notwendigen Parameter erfolgen kann; "a plan may recommend processing all low-level sensor data first, then formulating a small number of the most promising hypotheses, refining and elaborating each for these hypotheses until one best hypothesis emerges and finally focusing exclusively on that hypothesis until the complete solution is found", (33). In Agendas werden mögliche Aktionen an Regeln gekoppelt, die aktuell angewandt werden, um so auf der Grundlage bereits evaluierter Daten Lösungsprozesse vorantreiben zu können.

3. eine statische Wissensbasis, die Fakten und Regeln über das Problemgebiet enthält; hier werden in Form unterschiedlicher Formalstrukturen zur Wissensrepräsentation (siehe entsprechendes Kapitel in dieser Arbeit) die Objekte und Objektbeziehungen sowie heuristische Informationen und Kausalzusammenhänge eines Gebietes im Speicher des Programms verankert. Bevorzugte Formen der Wissensdarstellung sind Produktionsregeln und semantische Netzwerke, wobei die Regelstruktur die Repräsentation von kausalen Zusammenhängen und Aktionsabläufen unterstützt, während die Netzwerkformalismen eine hierarchisch geordnete Verknüpfung der Objekte begünstigen. Die Eigenschaftszuweisungen der Objekte werden in Form sogenannter "property lists" (LISP) oder prädikatenlogischer Ausdrücke realisiert. Oftmals ist in der Wissensbasis durch Eigenschaftszuordnungen bei den Parametern bereits verankert, wie Regeln angewandt werden, d.h. es existiert keine klare Trennung zwischen Wissensbasis und Kontrollstruktur; "unity of data and control structure" (34).

4. einen Interpreter, oder eine "inference engine"(35), der Auswahl und Anwendung der Regeln steuert. Diese Steuerung erfolgt, indem der Interpreter die Bedingungen von Regeln überprüft, deren Konklusionsteil Schlußfolgerungen enthalten, die für den jeweiligen Stand der Problemlösung wichtig sind. Die Überprüfung der Regelprämissen erfolgt durch eine "matching"-Prozedur(36), bei der die Parameterwerte der Prämissen mit den aktuellen Daten in einem speziellen Problemlösungsfall verglichen werden. Im einfachsten Fall kann der Interpreter in einem Produktionssystem als Selektions-Aktions - Schleife begriffen werden; "The interpreter in this simple design operates by scanning the LHS " (left-handed-side = Prämissenteil der Regel) " of each rule until one is found that can be successfully matched against the database" (37). Dabei übernimmt der Interpreter üblicherweise auch die Kontrolle für weitere Regelanwendungen, d.h. die Überprüfung neuer Regeln, wenn die Parameterwerte der Regelprämissen für den jeweiligen Fall noch nicht eruiert werden konnten (z.B. bei dem später noch detaillierter dargestellten System MYCIN die Kontrollstruktur des "backward chaining"). Weiter obliegt dem Interpreter die Aufgabe, Schlußfolgerungen von Regeln, deren Prämissen mit den aktuellen Daten übereinstimmten, in den dynamischen Datenspeicher zu übertragen, um die Daten eines konkreten Falls kontinuierlich zu aktualisieren.

5. eine Plan- oder Kontrolltabelle zur Ordnung der Regelfolge. Diese kann beispielsweise direkt an die Parameter der statischen Wissensbasis eines Systems gekoppelt sein, etwa durch sogenannte "updated-by"- oder "used-by" - Listen(38), in denen jeweils diejenigen Regeln enthalten sind, die zur Instantiierung des entsprechenden Parameters führen bzw. die auf diejenigen Regeln zeigen, in deren Prämissen das Attribut enthalten ist.

6. ein Wissensakquisitionsmodul, mit dem die Eingabe neuer Fakten möglich ist und die Neueingabe auf Konsistenz mit der alten Wissensbasis überprüft wird. In vielen Bereichen, in denen Expertensysteme konzipiert werden, ändert sich das Wissen über einen bestimmten Problembereich durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder veränderte Einschätzungen über Wirksamkeit und Relevanz von Fakten und Relationen kontinuierlich. Um zu gewährleisten, daß die somit notwendigen Systemmodifikationen auch von dem jeweiligen Benutzer vorgenommen werden können, ohne daß die Wissensbasis inkonsistent wird und Widersprüche aufweist, sollte nach Meinung vieler KI-Forscher in jedem größeren Expertensystem ein derartiges Modul enthalten sein.

7. ein Modul, als "justifier" (39) bezeichnet, das dem Benutzer den programminternen Lösungsweg erklärt und die Art der Problemlösung rechtfertigen kann. Dieser Programmteil ist insbesondere für die Akzeptanz eines Expertensystems durch den Endbenutzer von enormer Wichtigkeit. Ohne die Transparenz des systemintern vollzogenen Lösungsweges und die Möglichkeit, den Grund von Systemfragen und Systementscheidungen zu erfahren, würde der Einsatz von Expertensystemen im Alltag an der massiven Abwehr der Anwender scheitern. "Explanation serves several purposes, among these to reassure a human observer of the validity of a chain of inference steps" (40). Darüberhinaus stellt die "Erklärungskomponente" (41) auch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Expertensystemen gegenüber effizienten Datenbankprogrammen dar.

e hier nur in Kürze angeführten Komponenten eines idealtypischen Expertensystems existieren in n bislang entwickelten Programmen lediglich zum Teil. Anhand einiger konkreter Systeme wird e Funktionsweise der wichtigsten Module später noch detaillierter dargestellt werden.

1.7 Aufgabenbereiche von Expertensystemen

s Aufgabenspektrum von Expertensystemen ist weit gestreut. Dabei lassen sich die Systeme nicht r hinsichtlich des speziellen Fachgebietes (Medizin, Chemie etc...) unterscheiden, sondern ch nach der Art der Problembereiche. Im Folgenden werden somit die wichtigsten Aufgabenfelder rgestellt:

TERPRETATION: Diese Expertensysteme sind dazu in der Lage, beobachtete oder vom Benutzer ngegebene Daten zu analysieren. Ziel dieser Analyse ist es, den jeweiligen Daten entsprechende mbolische Bedeutungen zuzuweisen, die zur Erklärung der spezifischen Situation des Datenum- lds benutzt werden. Als Beispiele für derartige Aufgaben sind zu nennen: die Interpretation n Signalen gesprochener Sprache und die Zuweisung zu entsprechenden Woertern oder die Analyse n chemischen Massenspektrogrammen zur Bildung von Strukturformeln.

RHERSAGE: Die Analyse von Daten zum Zweck der Vorhersage möglicher oder wahrscheinlicher nsequenzen einer gegebenen Situation zählt zu den Aufgaben dieser Kategorie von Expertensy- temen. Die Ableitung von Vorhersagen aus eingegebenen oder benutzerunabhängig eruierten Daten etwa durch Koppelung mit Datenaufzeichungsgeräten) basiert auf systemintern gespeicherten odellen, die mit den jeweils aktuellen Parametern instantiiert werden, so daß wahrscheinliche zenarios entworfen werden können. Bereiche, in denen Vorhersagesysteme Anwendung finden bzw. inden werden, sind beispielsweise Demographie-Vorhersagen, Wettervorhersagen, Verkehrslageprog- osen und militärische Operationsvorhersagen.

IAGNOSE: Auf der Basis von Daten unterschiedlicher Genese sind Diagnosesysteme dazu in der age, Fehler in Systemen oder dysfunktionale Prozesse herauszufinden und deren Ursachen zu rforschen. Dies erfolgt entweder durch die Anwendung von Wissen über die Verknüpfung von rozessen und Diagnosen oder durch die Fähigkeit, auf der Basis von Systemkenntnissen hypotheti- che Dysfunktionalitäten zu generieren und diese mit den aktuell vorgefundenen Fall zu vergleii- hen. Anwendungsbereiche für Diagnosesysteme sind vor allem die Medizin, d.h. die Diagnose von rkrankungen, die Elektronik und Elektrotechnik, der Bereich des Software-Debugging sowie ehlerdiagnosen im technischen Sektor.

ESIGN: Der Entwurf von Konstruktionsplänen für unterschiedliche Objekte auf der Basis von orgaben und Einschränkungen wird von Hayes-Roth(42) ebenfalls zu den Problemgebieten für xpertensysteme gezählt. Zu den Aufgaben dieser Systeme, die nicht klar abgrenzbar sind gegen- ber den bislang existierenden CAD/CAM-Programmen, gehören beispielsweise Schaltkreis- und onstruktionsentwürfe, die vom System eigenständig vollzogen werden können, indem auf das implementierte Wissen zurückgegriffen wird.

LANUNG: Planungssysteme entwerfen Aktionsabläufe, bei denen sie auf die gespeicherten Modelle von Handlungsabläufen zurückgreifen. Der Planungsentwurf kann dabei flexibel gehalten werden und individuelle Besonderheiten und fachspezifische Charakteristika berücksichtigen. Einsatzgebiete derartiger Planungssysteme sind Projekt- und Experimentplanungen, Routenfestlegungen und die Determination von Roboteraktionsabläufen.

EPARATUR: Systeme, mit denen die Diagnose eines Defektes und die daran anknüpfende Planung des notwendigen Reparaturablaufs möglich ist, sind gegenwärtig verstärkt in der Entwicklung begrif- fen. Zu den Anwendungsgebieten zählen vor allem Reparaturanweisungen zur Behebung mechanischer Defekte; diese Systeme werden manchmal auch mit maschinellen Reparaturan- leitungsbüchern verglichen.

AUSBILDUNG: Instruktionssysteme verfügen über eine Wissensbasis zum Fachgebiet, dessen Fakten und Zusammenhänge Studenten vermittelt werden sollen. Um den Instruktionsablauf benutzergerecht zu gestalten, ist in diesen Expertensystemen die Möglichkeit implementiert, eine hypothetische Beschreibung der studentischen Kenntnisse vornehmen zu können, Schwächen zu identifizieren und einen Instruktionsablaufplan so zu konzipieren, daß die zuvor eruierten Defizite abgebaut werden können. Die Vermittlung findet in Form eines interaktiven Tutorials zwischen Benutzer und System statt und zielt vornehmlich auf die Behebung von Wissenslücken: "they incorporate diagnosis and debugging subsystems that specifically address the student as the system of interest" (43).

KONTROLLE: Das komplexe Aufgabenspektrum derartiger Expertensysteme umfaßt die kontinuierliche Überprüfung und Auswertung wechselnder Situationen, daraus resultierende Voraussagen über weitere Abläufe, die Analyse möglicher Probleme und deren Ursachen sowie die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung derartiger Störfälle. Obwohl Expertensysteme mit einem solch breiten Aufgabenkreis bislang noch nicht existieren, sind in naher Zukunft folgende Einsatzgebiete geplant: Flugverkehrskontrolle, Geschäftsmanagement und Militäroperationen.

Darüberhinaus sind weitere Aufgabenschwerpunkte zu erwarten, die Bereiche wie automatisierte Bürotätigkeit, Überwachung und Debugging umfassen, wobei gegenwärtig kaum eine Eingrenzung der zu erwartenden Einsatzgebiete vorgenommen werden kann; die Zielsetzungen innerhalb der KI-Forschung richten sich auf eine möglichst umfassende Verbreitung von Expertensystemen.

4.2 Beispielsysteme

4.2.1 Einige der wichtigsten Expertensysteme

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Expertensysteme kurz vorgestellt. Um einen Vergleich dieser Programme zu erleichtern, wird eine einheitliche Struktur beibehalten, die Ziel, Methoden, Anwendung und zugrundeliegende Paradigmen beinhaltet. Die Form der Präsentation wurde an eine Darstellung Ermans(44) angelehnt.

MYCIN

Entwicklungsort:	Stanford University; Zeitraum zwischen 1970 - 1975, konzipiert von Shortliffe / Buchanan und anderen.
Zielsetzung:	Entwicklung eines medizinischen Diagnoseprogramms, das von Ärzten akzeptiert wird
Problemgebiet:	Bakterielle Bluterkrankungen und Meningitische Infektionen
Aufgabe:	Durchführung eines Interviews mit einem Arzt zur Diagnosefindung und Therapieempfehlung
Eingabedaten:	Beantwortung von Fragen zum jeweiligen Patienten, die vom System an den Benutzer gestellt werden
Ausgabe:	Nach Wahrscheinlichkeiten geordnete Liste von Diagnosen und Therapieempfehlungen
Paradigma:	Wissensbasis mit Objekt- und Parameterbeschreibungen und Produktionsregeln, ausführliche Suche mit backward chaining, Einbeziehung von Sicherheitsfaktoren, die als Maßstab für die Plausibilität einer Schlußfolgerung dienen
Benutzerinterface:	Dialog und Erklärungen in natürlicher Sprache
Tools:	Programmiert in LISP
Resultate:	Bisher nicht in allgemeiner Benutzung das System wird in Validitätstest überprüft und dient als Forschungsinstrument in der klinischen Ausbildung
Literaturhinweis:	Barr/Feigenbaum, "Handbook of AI", Vol. 2, S. 177 ff ; O'Shea/Eisenstadt, hier "Inside an Expert System" von Cendrowska/Bramer

DENDRAL

Entwicklungsort:	Stanford University, 1965 - 1970, entwickelt von Lindsay, Feigenbaum et al.
Zielsetzung:	Erprobung induktiver Inferenzmethoden in einem wissenschaftlichen Gebiet, hier der Chemie
Problemgebiet:	Organische Chemie: Massenspektrometrie
Aufgabe:	Identifikation chemischer Stoffe aus Massenspektrogrammen
Eingabedaten:	Histogramm mit Massenzahl
Ausgabe:	Beschreibung der Struktur einer chem. Verbindung, Strukturformel
Paradigma:	"Generate-and-test", d.h. Hypothesen-bildung und -überprüfung mit eingrenzender heuristischer Suche: nach Eingabe der Massenspektrogramme generiert das System hypothetische Strukturformeln, wandelt diese wieder in ein Massenspektrogramm um und vergleicht die Hypothesen mit der Eingabe
Benutzerinterface:	Im ursprünglichen System nicht vorhanden, jedoch wurde in der kommerzialisierten Fassung späterer Jahre eine Benutzerschnittstelle implementiert
Tools:	Programmiert in LISP
Resultate:	Erstes Expertensystem, d.h. Basis des Forschungszweigs "knowledge

engineering", große Anzahl an chemischen Publikationen
teraturhinweis: Lindsay, et al.; "DENDRAL", McGraw Hill 1980

CSYMA

twicklungsort: MIT, 1965 - 1970
elsetzung: Hochqualifiziertes Instrument für die symbolische Mathematik
oblemgebiet: Algebra, Differentialrechnung...
ufgabe: Assistenzsystem des Benutzers bei der Ausarbeitung komplexer symbolischer Manipulationen (Integral-Funktionen)
ngabedaten: Formeln und Anweisungen (interaktiv)
sgabe: Ergebnisse der Anweisungen
radigma: "Brute-force"(45), d.h. kein unmittelbarer Ansatz der Künstlichen Intelligenz, jedoch umfangreiche Wissensbasis zum Gebiet der symbolischen Mathematik
nutzerinterface: nicht vorhanden
ols: Programmiert in LISP
sultate: weit verbreitet genutzt, mächtiges System
iteraturhinweis: Barr/Feigenbaum, "Handbook of AI", Vol. 2, S. 143 - 149

ROSPECTOR

ntwicklungsort: Stanford Research Institute (SRI), 1970 - 1975, Duda et al.
ielsetzung: Anwendung des MYCIN-Paradigmas in nichtmedizinischen Gebieten, hier der Geologie
roblemgebiet: Geologische Exploration
ufgabe: Auswertung geologischer Lagen nach potentiellen Mineralvorkommen
ingabedaten: Interview des Benutzers durch das System
usgabe: Evaluation der beschriebenen Lage in Hinblick auf Mineralvorkommen mit Wahrscheinlichkeitswerten
aradigma: Regelartiges semantisches Netzwerk als Wissensbasis, Schlußfolgerungen mit Berücksichtigung von unsicherem Wissen; Suchstrategie: backward-chaining
enutzerinterface: Erklärung des vollzogenen Schlußfolgerungsprozesses und Begründung einzelner Entscheidungen werden vom System geliefert
ools: Anfangs keine, später KAS (= Tool zur Konzeption von Expertensystemen)
esultate: Entdeckung eines Molybdänvorkommens im Werte von ca. 100 Millionen Dollar
Diskussion über Vermarktung im Gange
Literaturhinweis: Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 155ff,; Erman, IJCAI 1983; Brachman/Amarel, S. 54ff., (46).

PUFF

Entwicklungsort: Stanford University, 1978, Aikins et al.
Zielsetzung: Anwendung des Paradigmas von MYCIN in einem alternativen medizinischen Gebiet —[3] Erprobung des Tools 'EMYCIN'
Problemgebiet: Obstruktive Lungenerkrankungen
Aufgabe: Diagnose von Krankheitstyp und Schwere der Erkrankung
Eingabedaten: Daten des Patienten und Ergebnisse von Instrumentenmessungen zur Lungenfunktionsprüfung; Eingabe erfolgt über den ärztlichen Benutzer
Ausgabe: Unterstützung bei der Diagnosefindung und bei der Erstellung des Arztberichts
Paradigma: wie MYCIN: Wissensbasis mit Produktionsregeln, backward-chaining mit erschöpfender Suche, d.h. Bildung von möglichen Hypothesen und rückwärtige Verifikation, Einbeziehung von Unsicherheitsfaktoren in den Schlußfolgerungsprozeß
Benutzerinterface: PUFF beschreibt den intern vollzogenen Schlußfolgerungsprozeß, begründet die Bildung von Hypothesen und zeigt unterstützende Fakten auf
Tools: EMYCIN
Resultate: In routinemäßiger Benutzung am Pacific Medical Center in San Francisco, das System erwies sich in 85% aller Fälle als korrekt, wurde in Basic neu programmiert
Literaturhinweis: Aikins et al.,"PUFF: an Expert System for Interpretation of Pulmonary Function Data", in: Clancey/Shortliffe; "Readings in Medical AI"

GUIDON

Entwicklungsort:	Stanford University, 1979, Clancey et al.
Zielsetzung:	Entwicklung eines Instruktionssystems unter Anwendung der Wissensbasis von MYCIN zur Vermittlung dieses Lernstoffs
Problemgebiet:	Medizinische Ausbildung
Aufgabe:	Vermittlung des medizinischen Wissens von MYCIN an Medizinstudenten
Eingabedaten:	Interaktive Tutorials mit Studenten, Beantwortungen der Systemfragen, die als Grundlage dienen für die Einschätzung des studentischen Niveaus, darauf basierende Planung des Instruktionsverlaufs
Ausgabe:	Interaktiv konzipierte Lektionen, die dem jeweiligen Wissensstand des studentischen Benutzers angepaßt sind
Paradigma:	Wissensbasis mit Produktionsregeln, zahlreiche Fragen an den Benutzer zur Kontrolle des Gelernten
Benutzerinterface:	Natürlichsprachlicher Dialog zwischen dem Benutzer und dem System als Basis des interaktiv konzipierten Tutorials; Erklärungen durch das System auf Anfrage möglich
Tools:	Teils MYCIN, teils LISP
Resultate:	Anregung weiterer Forschung sowie Weiterentwicklung von MYCIN, Grundlage von didaktischen Expertensystemen
Literaturhinweis:	Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 267ff, Clancey et al. in ders/Shortliffe, S. 256

INTERNIST/CADUCEUS

Entwicklungsort:	University of Pittsburgh, 1970 - 1980, Pople et al.
Zielsetzung:	Modellbildung des klinischen Weges der Diagnosefindung und Verankerung einer vollständigen Wissensbasis über das Gebiet der Inneren Medizin
Problemgebiet:	Innere Medizin
Aufgabe:	Selektion von Krankheitsdiagnosen, Hypothesenbildung auf der Basis zuvor ausgewerteter Daten
Eingabedaten:	Liste von Symptomen und Manifestationen von Patienten
Ausgabe:	Liste von damit übereinstimmenden Diagnosen
Paradigma:	Netzwerkbasierte Wissensbasis mit über 500 Krankheiten, 350 Krankheitsmanifestationen und 100.000 Symptomverknüpfungen, Unsicherheitswerte sind in den Schlußfolgerungsprozeß miteinbezogen, der Inferenzprozeß ist sowohl daten- als auch hypothesengesteuert (forward- und backward chaining)
Benutzerinterface:	Die Erklärungsfähigkeiten des Systems sind minimal, werden aber gegenwärtig erweitert.
Tools:	Programmiert in LISP
Resultate:	Wissensbasis des Gebietes der Inneren Medizin wird als zu 90% vollständig angegeben; das System wird derzeit noch experimentell in der Ausbildung von Medizinern eingesetzt
Literaturhinweis:	Barr/Feigenbaum, Vol. 2, S. 197, Brachman/Amarel, S. 54ff

CASNET/GLAUCOMA

Entwicklungsort:	Rutgers University, 1977, Weiss, Kulikowski und Safir
Zielsetzung:	Konzeption eines medizinischen Diagnosesystems auf der Basis eines dynamischen Krankheitskonzepts
Problemgebiet:	Glaukomerkrankungen
Aufgabe:	Diagnose, Interpretation und Therapie von Glaukomerkrankungen
Eingabedaten:	Patiendaten, die vom Benutzer auf Fragen des Systems eingegeben werden
Ausgabe:	Diagnose der Erkrankung und Therapieempfehlung
Paradigma:	Wissensbasis in Form eines semantischen Netzwerks, Problemlösung unter Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren, alle Schlußfolgerungen sind gewichtet, so daß eine Selektion der Inferenz hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit vorgenommen werden kann, der Reasoning-Prozeß verläuft datengesteuert (forward chaining) unter Einschränkung der implementierten Krankheitsmodelle
Benutzerinterface:	Dialoge in eingeschränkter Sprache sind möglich, das System vermag dem Benutzer seine Schlußfolgerungen offenzulegen; zusätzlich können unterschiedliche Schulmeinungen berücksichtigt werden und dem Benutzer alternativ präsentiert werden. Zu den jeweils benutzen Regeln bei Systementscheidungen werden Literaturanmerkungen gemacht

s: LISP
ltate: hochqualifiziertes System, vergleichbar dem Standard von Ophthalmologen mit hoher Expertise, hoher Nutzungsgrad in der Forschung bei amerikanischen und japanischen Ophthalmologen
ratur: Weiss/Kulikowski et al,"A Model-Based Method for Computer-Aided Medical Decision Making", in Clancey/Shortliffe

SAY II

icklungsort: Carnegie-Mellon-University, 1980, Erman et al.
setzung: Verstehen von Sprache
lengebiet: Formulierung und Beantwortung von einfach strukturierten Fragen zur Wissensbasis
gabe: Generierung einer korrekten Frage auf der Basis von Kenntnissen über Grammatikalische Regeln der Satzbildung
gabedaten: Sprachwellenmuster
gabe: Geordnete Liste von Hypothesen über die Spracheingabe, zusätzliche Ausgabe einer Frage, die gebildet wird auf der Grundlage der systeminternen Wissensbasis und der besten Hypothese
digma: Hypothesenbildung auf der Grundlage von unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Wissensquellen, "Agenda"-basierter Schlußfolgerungsprozeß mithilfe einer sogenannten "blackboard", d.h. eines dynamischen Datenspeichers, durch den die datenspezifische Verkoppelung der Wissensmodule möglich ist.
ls: Programmiert in der Sprache SAIL
ultatte: Protoyp für agenadabasierte Systeme, Initiierung weiterer Forschung auf der Grundlage dieses Prinzips
eraturhinweise: Erman, IJCAI 1983 Karlsruhe, Barr/Feigenbaum, "HAndbook of AI"

wicklungsort: Carnegie-Mellon-University und DEC
lsetzung: Demonstration effizienter Lösungen für bislang kaum lösbare praktische Probleme
blemgebiet: Computer Hardware Konfiguration
gabe: Zusammenstellung der Einzelkomponenten von VAX-Computersystemen
gabedaten: Geordnete Liste der Einzelkomponenten
gabe: Diagramme über Zusammensetzung der Einzelkomponenten und Hinzufügung einer Liste mit zu addierenden Elementen
radigma: Wissensbasis mit Produktionsregeln, Schlußfolgerungsprozeß datengetrieben (forward chaining)
utzerinterface: Dialog zwischen System und Benutzer möglich
ols: OPS 5
sultate: Routinemäßige Anwendung bei DEC, weitere Systeme in Vorbereitung
teraturhinweis: Mc Dermott, "R1: A rule-based configurer of computer systems", CMU Report 1980

sätzlich existieren noch eine Fülle anderer Systeme, die im folgenden Abschnitt nicht in der er vorgenommenen Ausführlichkeit dargestellt werden, da ihnen innerhalb der KI-Forschung nicht e gleiche Bedeutung zugesprochen werden kann wie den oben beschriebenen.

2.2 Weitere Expertensysteme

dere Expertensysteme werden im Folgenden kurz exemplarisch vorgestellt, um einen Überblick er die Spannbreite der Anwendungsbereiche zu geben. Hierbei stehen medizinische und didakti- he Systeme im Vordergrund, da sie für die späteren kritischen Betrachtungen von besonderer deutung sind.

Medizinische Expertensysteme:

"PIP (Present Illness Program)", entwickelt 1976 am MIT von Szolovits/Pauker; Aufgabenbereich: Diagnose von Nierenerkrankungen auf der Basis eingeschränkter Informationen;
"Digitalis Therapy Advisor", entwickelt 1975-78 am MIT von Gorry/Silverman/Pauker; Aufgaben- bereich: Konzeption patientenadäquater Therapiepläne für eine Digitalis-Therapie;

- "IRIS", entwickelt 1977 an der Rutgers Universität durch Trigoboff/Kulikowski; Aufgabe: Erstellung von medizinischen Diagnosesystemen (Tool) in unterschiedlichen medizinischen Bereichen, (CASNET basiert auf IRIS);
- "EXPERT", entwickelt 1979 an der Rutgers University von Weiss/Kulikowski; Aufgabe: Tool zur Bildung von Expertensystemen unter besonderer Berücksichtigung von Krankheitsmodellen, bisherige Systeme wurden entwickelt im Bereich der Rheumatologie und Endokrinologie;
- "CENTAUR", entwickelt von Aikins et al. 1980-83 an der Stanford University; Aufgabenbereich: prototypische Repräsentation der Komponenten von Lungenerkrankungen;
- "ONCOCYN", entwickelt von Langlotz/Shortliffe 1983 an der Stanford University; Aufgabenbereich: Assistenz von Ärzten bei der Planung einer Chemotherapie für Krebspatienten;
- "ESDAT" (Expert System for Diagnosis and Therapy), entwickelt 1982 an der Universität Wien von Horn; Aufgabe: Entscheidungsunterstützendes System im Bereich der Ersten Hilfe;
- "MED1" und "MED2", entwickelt 1983 an der Universität Kaiserslautern von Puppe/Puppe; Aufgabenbereich: Diagnose der Ursprungserkrankung bei Schmerzen im Brustkorb.

2. Expertensysteme in der Ausbildung

- "SOPHIE", entwickelt 1975 bei der Bolt Beranek and Newman Inc. von Brown/Burton; Aufgabe: Vermittlung von Wissen im Bereich Elektronik, lehrt Studenten durch die Simulation elektronischer Labors das Debugging defekter Ausrüstungsgegenstände in Form eines interaktiven Tutorials;
- "SCHOLAR", entwickelt 1970 bei der Bolt Beranek and Newman Inc. von Carbonell/Collins; Aufgabe: Vermittlung von Geographiekenntnissen über Südamerika mithilfe eines interakiven Tutorials, bei dem Systemfragen und studentische Antworten in normalem Englisch getätigt werden können.
- "WHY", entwickelt 1978 bei der Bolt Beranek and Newman Inc. von Collins/Stevens; Aufgabe: Vermittlung von Wissen über die geophysikalischen Bedingungen des Regens in Form eines interaktiven Tutorials, mit dessen Hilfe die Komplexität der Problemstellung vermittelt werden soll;
- "WEST", entwickelt 1977 bei der Bolt Beranek and Newman Inc. von Burton/Brown; Aufgabe: spielerisches Lernen von effizienten Strategien der Problemlösung;
- "WUMPUS", entwickelt 1977 am MIT von Goldstein/Carr; Aufgabenbereich: Vermittlung von Kenntnissen über Wahrscheinlichkeitsrechnung, Entscheidungstheorie, Logik und Geometrie auf der Baiss eines Computerspiels;
- "BUGGY", entwickelt 1978 bei der Bolt Beranek and Newman Inc. von Larkin et al.; Aufgabe: die Identifikation von Defiziten der studentischen Kenntnisse über die Grundlagen der Arithmetik; diese erfolgt durch eine Analyse der studentischen Fehler bei der Lösung einfacher Rechenaufgaben;

3. Expertensysteme aus anderen Bereichen

- "DRILLING ADVISOR", entwickelt Anfang der Achtziger Jahre bei Teknowledge and Elf Aquitaine; Aufgabe: Diagnose von Defekten in Ölbohranlagen und Erstellung eines Reparaturplans, zusätzliche Hinweise zur zukünftigen Vermeidung der jeweils aufgetretenen Defekte;
- "SACON", entwickelt an der Stanford University Ende 1970 von Bennett et al.; Aufgabe: Strukturanalyse von komplexen Softwarepaketen;
- "HASP", entwickelt 1982 an der Stanford University; Aufgabe: Transformation eingegebener Signale in symbolische Bezeichnungen;
- "MOLGEN", entwickelt an der Stanford University im Jahre 1980 von Stefik et al.; Aufgabe: Planung von molekulargenetischen Experimenten;
- "CRYSALIS", entwickelt 1977 an der Stanford University von Engelmore et al; Aufgabenbereich: Eiweiß - Kristallographie, d.h. die Interpretation von Elektronendichteaufzeichnungen;
- "DEX-C3", entwickelt 1983-85 bei der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung in Zusammenarbeit mit Ford: Fehlerdiagnosesystem zur Identifikation von aufgetretenen Störungen in C3-Getrieben von Ford.

Neben diesen existieren jedoch noch eine Reihe anderer Systeme, die entweder keinen höheren Bekanntheitsgrad erlangten oder aber noch in der Entwicklung begriffen sind. Dies bezieht sich unter anderem auch auf die Programme, die gegenwärtig in der BRD fertiggestellt werden (z.B. bei Battele, Siemens, Nixdorf und der GMD).

Techniken und "Paradigmen" einer automatisierten Diagnose in der Medizin

1 Allgemeine Bemerkungen

im letzten Abschnitt deutlich wurde, existieren Expertensysteme in verschiedenen Problemge-
.en. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein besonderer Schwerpunkt auf Expertensysteme aus dem
zinischen Bereich gelegt werden. Dies erfolgt aus zwei Gründen:

Im Bereich Medizin sind bislang mehr Expertensysteme konstruiert worden als in allen anderen
Bereichen,
Die in Kürze mögliche, ja wahrscheinliche(47) Verbreitung medizinischer Expertensysteme und
ihr Einsatz in der alltäglichen Medizin werden die ersten soziokulturell sichtbaren Einflüsse
der KI überhaupt darstellen.

olgedessen wird in den folgenden Kapiteln die Darstellung medizinischer Expertensysteme einen
leutigen Vorrang einnehmen. Dies bezieht sich sowohl auf die Erläuterung von Techniken und
adigmen im Bereich des "knowledge engineering" als auch auf die detaillierte Darlegung der
ctionsweise von Beispielssystemen, die Grundlage der späteren Kritik von Expertensystemen
n wird.

Idee einer automatisierten klinischen Entscheidungshilfe in der Medizin entstand nicht erst
Zuge der Entwicklung von Expertensystemen. So wurden schon vorher Algorithmen entworfen, mit
en man sich um eine computerunterstützte Anamnese und Diagnose bemühte. Einige dieser Ansätze
len im Folgenden kurz vorgestellt werden, nicht zuletzt deshalb, um eine Einschätzung der
litativ neuen Methodik des "knoweldge engineering" zu ermöglichen.

.2 Datenanalyse-Programme

es der ersten Konzepte zur Automation medizinischer Entscheidungstätigkeit stellten die
enannten Datenanalyse-Programme dar. Mit Hilfe dieser Systeme sollten Krankheitsprognosen und
schätzungen über Therapieerfolge unterstützt werden. In den Datenbanken waren vorwiegend
ientendaten gespeichert, lediglich einige wenige Systeme verfügten über eigene Analysestrate-
en. Ziel derartiger Datenbankkonzepte war es, dem Arzt das Aufdecken von Korrelationen
schen Patientendaten zu ermöglichen und ihm so die Chance zu bieten, entsprechende Prognosen
einen Individualfall zu stellen bzw. die Effekte unterschiedlicher Therapien gegeneinander
zuwägen. Prinzip derartiger Konzepte ist demnach die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen
uellen Patientendaten mit bereits gespeicherten Fällen der Datenbank, um eine individuelle
ptomatik im Kontext bereits bekannter Daten besser einschätzen zu können.

n bekanntes, nach diesem Prinzip funktionierendes Programm ist das System "ARAMIS" (48), ein
tenbankprogramm zur Rheumatologie. Aktuelle Patientendaten werden mit den gespeicherten
llektiven verglichen, um auf der Grundlage der gefundenen Zusammenhänge Prognosen über den
ankheitsverlauf und die Wirksamkeit unterschiedlicher Therapiekonzepte zu tätigen. Dies
folgt systemintern über Durchschnittsbildungen und Korrelationsbestimmungen.

e Datenanalyseprogramme können jedoch keine Diagnosen stellen, sondern liefern lediglich
tscheidungshilfen bei der Auswahl von Therapien. Neue Patientendaten werden zudem nicht
tomatisch vom System gespeichert, sondern müßen jeweils vom Programmentwickler in die Daten-
nk eingegeben werden. Als Vorteil von analysierenden Datenprogrammen ist zu nennen, daß diese
steme über Wissen insofern verfügen, als ihnen ad hoc ein Überblick über alte Fälle möglich
t. Erstrebenswert wäre eine Koppelung solcher Programme mit Expertenwissen, ein Aspekt, der
äter noch diskutiert werden soll.

3.3 Mathematische Modelle

ne wesentliche Bedeutung haben auch heute noch mathematische Modelle innerhalb der Medizin.
e Berechnung der Dosierungen von Medikamenten unter Berücksichtigung der speziellen Daten
nes Patienten gehört hier zu den bedeutendsten Aufgaben. Durch die Substitution von Variablen
nn ein Programm gewünschte Parameter berechnen, etwa die Digitalisdosierung in Abhängigkeit
n Symptomatik, Körpergewicht und Nierenausscheidung eines Patienten oder die Evaluation von
sregularitäten im Elektrolythaushalt.
e Relationen zwischen den einzelnen Parametern sind zuvor in Form mathematischer Funktionen in
s Programm integriert worden. Oft findet eine programmtechnische Koppelung statt zwischen

diesen mathematischen Modellen und sogenannten "klinischen Algorithmen", d.h. Behandlungsprotokollen, die für die Therapie von Patienten erstellt werden. Obwohl sich die mathematischen Modelle in manchen Bereichen als äußert nützlich erwiesen haben, ist ihre Anwendbarkeit in der Medizin auf jene Probleme beschränkt, die sich quantifizieren lassen, während die Fülle qualitativer Entscheidungen unberücksichtigt bleibt; "few areas of medicine are amenable to firm, quantitative description" (49). Auch die Verknüpfung der mathematischen Programme mit klinischen Algorithmen erwies sich in der Vergangenheit als zu unflexibel, da die Strukturen der Algorithmen zu starr konzipiert waren. Angestrebt wird auch hier die Integration mathematischer Modelle in Expertensysteme.

4.3.4 Statistische Mustererkennungs-Techniken

Mustererkennungsprozeduren dienen der Klassifikation von Krankheitssymptomen und ihrer Zuordnung zu entsprechenden Krankheitstypen. "Pattern recognition techniques are also used for prognosis-...or predicting disease duration, time course, and outcomes" (50). Die Mustererkennung erfolgt durch zwei unterschiedliche Methoden. So wird einerseits ein direkter Vergleich zwischen den aktuellen Symptomen eines Patienten und den cluster-artig angeordneten Symptomen in der Datenbasis vorgenommen. Andererseits werden statistische Berechnungen über die Wahrscheinlichkeit durchgeführt, mit der die Symptomatik eines Patienten mit einem bestimmten Krankheitstyp korreliert. Dies erfolgt beispielsweise durch die Errechnung des Regressionsköffizienten, mit dessen Hilfe bestimmt werden kann, ob sich ein spezielles Symptom des Patienten noch innerhalb der Streuungsbreite einer Krankheitskategorie befindet. Die statistische Mustererkennung bezieht sich vor allem auf instrumentell erfaßbare Symptome, d.h. Labordaten, Röntgenbilder etc. Die Effizienz dieses Konzepts automatisierter Diagnosefindung erhöht sich naheliegenderweise mit der Zahl der Symptome, die für einen speziellen Patienten ermittelt werden konnten, da die Koinzidenz zwischen den Symptomen eines Krankheitstyps und denen eines Patienten so präziser bestimmt werden kann. Shortliffe und andere(51) äußern die Überzeugung, daß diese Prozeduren insbesonderer dann sehr wirksam funktionierten, wenn sie mit einer fachlichen Wissensbasis und einem Interaktionsmodul gekoppelt würden.

4.3.5 Bayes-Theorem

Auf der Basis des Bayes-Theorems wurde ein weiteres Konzept zur Automation der Diagnoseerstellung entwickelt. Berechnet werden kann hier die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung in Abhängigkeit von Symptomen und spezifischen Daten eines Patienten, wobei als Grundlage der Wahrscheinlichkeitsberechnung die allgemeine Häufigkeit der jeweiligen Krankheit in die Berechnungen miteinfließt. Entscheidende Werte sind damit die a priori-Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung und die Bedingungswahrscheinlichkeiten der beobachteten Symptome.

Eine notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Bayes- Theorems ist die Unabhängigkeit der Einzelbedingungen, eine Prämisse, die in der Medizin im allgemeinen kaum auftritt. " The assumption of conditional independence of symptoms usually does not apply and can lead to substantial errors in certain settings" (52). Infolgedessen kann diese Methode als nur begrenzt gültig bezeichnet werden für eine automatisierte Diagnosefindung, da sie der Verwobenheit medizinischer Symptomatik widerspricht.

4.3.6 Konzept der Entscheidungstheorie

Als Grundlage für die Anwendung der Entscheidungtheorie dient die Bestimmung von Parametern, die als wesentlich gelten für bestimmte Entscheidungen; so sind an Wertemuster dieser Parameter Entscheidungen direkt gebunden, die als Einzelschritte im Ablauf des Entscheidungfindungsprozeßes wirksam werden. "The decision-making process can be seen as a sequence of steps in which the clinicial selects a path through a network of plausible events and actions (53). Entscheidungs- und Wahrscheinlichkeitsknoten bilden einen Entscheidungsbaum, wobei die einzelnen Knoten oftmals mit den "Kosten" einer Entscheidung (z.B. Komplikationen, Patientenbelästigung, finanzielle Kosten etc...) belegt werden, um sie auch durch solche Faktoren zu beeinflussen. Ziel dieser Methode ist somit, positive und negative Aspekte gegeneinander abzuwägen, um zu einer adäquaten Entscheidung zu kommen. Bei der Bewertung dieses Konzepts automatisierter Entscheidungsfindung ist besonders hervorzuheben, daß hier erstmalig versucht wird, den menschlichen Entscheidungsprozeß zumindest in Teilaspekten auf eine Maschine zu übertragen. Problematisch bleibt vor allem die Quantifizierung und damit einhergehende Wertung von Entscheidungen, die methodische und ethische Probleme aufwirft.

3.7 Symbolische Schlußfolgerungsprozesse

s letztes Konzept bei der Darstellung unterschiedlicher Ansätze zur Automation klinischer scheidungen soll vergleichend kurz auf die Methodologie der Künstlichen Intelligenz eingegan- werden. KI-Programme, im speziellen die medizinischen Expertensysteme, unterscheiden sich den bisher vorgestellten Algorithmen dadurch, daß sie vom Benutzer unabhängig Schlußfolge- gen ziehen können, d.h. eigenständig Diagnosen finden auf der Grundlage der Daten eines tienten. "Such programs gain their power from qualitative, experiential judgements, codified co-called rules of thumb or heuristics, in contrast to numerical calculation programs whose wer derives from the analytical equations used" (54).

rry (55) formulierte im Jahre 1973 als erster das Ziel, symbolische Techniken in die automati- erte medizinische Entscheidungsfindung zu integrieren. Er formulierte folgende Hypothesen:

- Klinische Entscheidungen basieren vor allem auf umfangreichem Wissen und Erfahrungen, die sich regelartig ausdrücken lassen;
- dieses Wissen ist zwar faktenorientiert, jedoch auch beurteilend;
- unsichere Fakten sind charakteristisch für das Wissen eines Klinikers. Der Umgang mit diesem Wissen basiert weniger auf statistischen Wahrscheinlichkeitszuordnungen, als vielmehr auf subjektiven Einschätzungen.

uf der Grundlage dieser Prämissen wurden erste Ansätze gestartet, symbolische Inferenzen als undlage automatisierter klinischer Entscheidungen zu benutzen. Das neue Konzept unterschied ch vor allem darin von allen bisherigen, daß in den nunmehr entwickelten Programmen Wissen er das Problemgebiet und Problemlösungsmechanismen gemeinsam verankert wurden. Ein weiterer ualitativer Unterschied bestand darin, daß keiner der früheren Entwürfe den systeminternen ntscheidungsprozeß dem Benutzer erklären und dokumentieren konnte. Gegenüber den vorab-determi- ierten, starr strukturierten oder ausschließlich berechnenden Programmen stellten die Experten- ysteme einen qualitativen Sprung dar im Hinblick auf die Realisierung der Intention, klinische ntscheidungsfindungen auf Computer zu übertragen.

4 Grundlagen der Konzeption medizinischer Expertensysteme

4.1 Die Bedeutung der KI-Forschung fuer Automatisierungs- bemuehungen in der Medizin

ie Zielsetzung, KI-Programme für den Bereich der Medizin zu entwickeln, gründete vornehmlich uf zwei Faktoren. Erstens erwies sich das Gebiet der Medizin zunehmend als derart komplex, daß s unmöglich von einem einzelnen Arzt vollständig überblickt werden konnte, zumal neue For- chungsergebnisse das vorhandene Wissen kontinuierlich veränderten. "The gap between what a doctor should know and what can be retained and utilized is continually widening" (56). Zweitens atten sich die bisherigen Ansätze zur computerunterstützten medizinischen Entscheidungsfindung ls zu rigide erwiesen, um den Anforderungen des Klinikalltags flexibel begegnen zu können (57). ur Bewältigung dieses Problems wurde daher die Entwicklung von Computersystemen anvisiert, die ber große Datenbanken verfügen und zudem Schlußfolgerungsmöglich- keiten besitzen. Durch die ransformation von Expertenwissen in Computerprogramme hoffte man, Programme entwickeln zu können, die über eine größere Leistungsfähigkeit und Variationsbreite als die früheren Ansätze erfügten. Dabei zielte man darauf, diese Systeme als Hilfsmittel für den Arzt bei Diagnose und herapie einzusetzen. "Because of the accelerated growth in medical knowledge, physicians have tended to specialize and to become more dependent on assistance from other experts when presen- ted with a complex problem outside their own area of expertise" (58). Nicht nur die Effizienz des Klinikbetriebes sollte somit gesteigert werden, sondern zudem nahm man an, daß der Einsatz von Expertensystemen positive Auswirkungen auf das Arzt-Patient- Verhältnis haben könne. "One may hope that the computer well equipped to store a large volume of information and ingeniously programmed to assist in decision making, will help free the physician to concentrate on the application of bedside skills, the management of the emotional aspects of disease, and the exercise of good judgement in the nonquantifiable aspects of clinical care." (59). Als weiterer wichtiger Anwendungsbereich für medizinische Expertensysteme wurde der Ausbildungssektor benannt. In vielen Fachbüchern, so beispielsweise Shortliffe(60), sei der Weg der medizinischen Entscheidungsfindung nur ungenau beschrieben, so daß dem Anfänger der Diagnoseprozeß oft unklar bleibe. Durch die Fähigkeit von Expertensystemen, dem Benutzer den systemintern vollzogenen Lösungsweg aufzuzeigen und Einzelentscheidungen begründen zu können, ließen sich somit Teilbe- reiche des klinischen Entscheidungsprozesses dem auszubildenden Mediziner vermitteln.

Medizinische Expertensysteme sollten dieser Auffassung entsprechend folgende Aspekte berücksichtigen:

- die Steigerung der Genauigkeit und der Reliabilität von klinischen Entscheidungen;
- die Verbesserung der Kosteneffizienz von Tests und Therapien durch eine Ausbalancierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses;
- die Vertiefung der Kenntnisse über klinisches Wissen und klinische Entscheidungsfindungen.

Mit der Realisierung dieser Forderungen wären konkrete Verbesserungen des klinischen Betriebs durch die Expertensysteme zu erzielen.

4.4.2 Die Besonderheiten des medizinischen Fachgebiets

Innerhalb der KI-Forschung wird die Medizin als Fachgebiet betrachtet, in dem sich die Strukturen zur Repräsentation von Wissen in Computern zwanglos anwenden ließen. Gleiches wird für die Problemlösungsmethoden angenommen, wobei die Diagnosefindung als das eigentliche Problem gilt.

Die Anwendung von KI-Methoden bei der Entwicklung medizinischer Expertensysteme könne, so die KI-Forscher, auch der Medizin dienen: "medical AI researchers are helping to formalize medical knowledge" (61). Die Strukturierung des medizinischen Wissens, Bedingung für die Konstruktion eines Expertensystems, diene durch den Formalisierungsprozeß letztlich auch der Theoriebildung in der Medizin und sei damit ein wichtiges Kriterium in der Ausbildung angehender Mediziner.

Die Implementation medizinischen Wissens in Expertensystemen setzt eine genaue Analyse der zu formalisierenden Komponenten voraus. Gerade im Bereich der Medizin ist zum Zwecke der Abgrenzung gegenüber herkömmlichen Programmen die in der KI-Forschung vorgenommene Differenzierung zwischen Daten und Wissen von enormer Wichtigkeit. Daten sind Kollektive ("records") von Informationen, z.B. wiss. Meßdaten, Patientdaten im Krankenhaus etc...; Wissen impliziert diese Daten, umfaßt aber darüberhinausgehend noch die Relationen zwischen Fakten, generelle Muster, kausale Zusammenhänge und Prozeduren zur Problemlösung. Wissensbasen sind generell, während Daten speziell sind (z.B. generelle Regeln über Krankheiten gegenüber speziellen Daten über einen Patienten). Shortliffe, Buchanan und Feigenbaum (62) differenzieren in diesem Zusammenhang das medizinische Wissen in Computersystemen noch stärker; sie nennen vier unterschiedliche Wissenstypen:

- numerisches Wissen (Wissen aus Datenanalysen);
- beurteilendes und subjektives Wissen;
- wissenschaftliches, theoretisches Wissen;
- strategisches Wissen, Metawissen.

Im Kontext der KI-Forschung hat sich während der letzten Jahre eine kontinuierliche Verschiebung des computergespeicherten Wissens ergeben, die von der Implementation reiner Beobachtungsdaten immer mehr zu der Verankerung symbolischen und beurteilenden Wissens führte. Gerade durch die Repräsentation der Erfahrungen von Fachleuten in Expertensystemen gewannen Meinungen und subjektive Urteile an Gewicht und drängten die ausschließlich numerischen Konzepte gegenüber den symbolischen immer mehr in der Hintergrund. Große Datenbanksysteme werden so zunehmend ersetzt durch Programme, die zu benutzerunabhängigen Schlußfolgerungen in der Lage sind und mit einem geringerem Umfang an Fakten operieren können.

Die Wissensbasen in Expertensystemen bilden Modelle über Krankheiten; diese gründen nicht auf vollständig erfaßten Kausalprozessen sondern auf empirischen Beobachtungen, so daß die jeweiligen Modelle stets nur eine Annäherung an die Realität darstellen und unvollständig bleiben müssen. "As models, knowledge bases are incomplete in that they are approximate and omit levels of detail"(63). Auch stellen die Wissensbasen stets nur einen Ausschnitt aus dem Wissens- und Erfahrungsschatzes eines Experten dar, bei dem Details unterschlagen werden und die pathophysiologischen Grundlagen von Erkrankungen unberücksichtigt bleiben. Die Reduktion des dargestellten Wissens ist im Bereich der Medizin deshalb so besonders problematisch, da hier eine auftretende Symptomatik Ursachen haben kann, die gar nicht mehr zu dem jeweils repräsentierten Problemfeld gehört. Wird in einem solchen Fall vom System der Versuch gemacht, eine Erkrankung als passend auszuwählen, die im Kontext des jeweiligen Partikularbereichs noch enthalten ist, kann zwar eine Diagnose gefunden werden, die jedoch insgesamt gesehen völlig falsch ist. Bei der Konzeption eines medizinischen Expertensystems stellt die Strukturierung des Wissens eines der elementaren Probleme dar. Gerade in der Medizin ist das Expertentum gekennzeichnet durch eine langjährig erworbene Erfahrung, die eher assoziativ als strukturiert ist. Die Transformation individueller

ristiken in eine Formalsprache bleibt auch dann schwierig, wenn man versucht, durch Kategori-erung der Einzeltatsachen eine bessere Gliederung des Problemgebiets zu erzielen. Durch idizierung der Fakten hinsichtlich ihrer Klassenzugehörigkeit, durch Determination kausaler, tlicher und hierarchischer Objektverknüpfungen, sowie durch erkrankungsbezogene Clusterung sucht man, die Diffusität des medizinischen Gebietes zu konkretisieren. Zusätzlich bemüht man h bei der programminternen Repräsentanz der Problemlösungsmethoden um eine möglichst adäquate hbildung der Schritte, welche von den Experten als wesentlich für die Aufgabenbewältigung schrieben werden. Die hierzu implementierten Kontrollstrategien zur Steuerung des Problemlö-gsprozesses werden häufig durch Entscheidungs- oder Suchbäume formalisiert, wobei jeder ten immer als genereller medizinischer Begriff betrachtet werden muß (z.B. Patientenknoten, ganismusknoten etc..). Durch die Vernetzung der Knoten untereinander kann in medizinischen stemen die Modellbildung sowohl über eine Krankheit als auch über die Symptomatik eines krеten Patienten vorgenommen werden.

4.3 Expertensysteme in Gegenüberstellung zu medizinischen Fachbüchern

e schon mehrfach erwähnt geht es bei der Konzeption von Expertensystemen vor allem um die präsentierung der individuellen Kompetenz von Experten. Die Berechtigung einer solchen tention sehen viele Autoren (z.B. Clancey/Shortliffe(65)) darin, daß Expertensysteme andere nensionen des klinischen Wissens berücksichtigen als dies in Fachbüchern realisiert wird. Da eses Wissen jedoch nicht nur im Ausbildungsprozeß relevant ist, sondern auch im klinischen ltag präsent sein muß, werden Expertensysteme als wichtige Ergänzung zu Textbüchern angesehen, re Konzeption teilweise damit sogar begründet. Die Differenzierung zwischen dem Wissen in pertensystemen und dem in Fachbüchern erfolgt an unterschiedlichen Punkten. So wird an chbüchern kritisiert, daß hier keine klare Abgrenzung der verschiedenen Wissensdimensionen rgenommen würde, d.h. beispielsweise nicht differenziert werde zwischen kausalen Zusammenhän-n einzelner Symptome und den Diagnosevorgängen. Textbücher zeichneten sich im Gegensatz zu den aren Strukturen in Expertensystemen durch eine oftmals verwirrende Verwobenheit der Problem-ellung aus. Die in Expertensystemen übliche Präzisierung und Strukturierung von Wissen könnte er nach Meinung vieler KI-Forscher Abhilfe schaffen. Als besonderer Vorteil von Expertensyste-n gegenüber Fachbüchern wird die Tatsache genannt, daß in Computerprogrammen die Problemlö-ngsheuristiken von Experten den wesentlichen Teil der Wissensbasis ausmachen. Der Benutzer nes Expertensystems wird somit in die Lage versetzt, den Problemlösungsprozeß nachzuvollziehen d Kenntnisse über Strategien zur Aufgabenbewältigung zu gewinnen. Dies wird in einem Textbuch i dieser klaren Form in den seltensten Fällen realisiert. Hier steht die Beschreibung von mptomatischen Zusammenhängen im Vordergrund, so daß es oft dem Leser selbst überlassen bleibt, us den beschriebenen Fakten den Diagnoseprozeß eigenständig herauszufinden. "Textbooks sit here inertly, relying on you to search for the relevant facts and then to infer solutions on your own." (66). Die hier negativ bewertete Notwendigkeit, als Leser eines Textbuches zumindest eilweise selbständig die Diagnosefindung zu eruieren, impliziert jedoch wesentliche, von I-Forschern kaum registrierte Vorzüge. Die individuelle Auseinandersetzung mit einem Text setzt ine selbständige Denkleistung voraus und schafft damit die Voraussetzung nicht nur für ein irkliches Verständnis der Problematik, sondern auch für eine unabhängige Urteilsbildung. engegenüber wird der Benutzer eines Expertensystems, insbesondere dann, wenn es sich um einen nfänger handelt, nur allzu rasch die vom System präsentierte Form der Diagnose akzeptieren und ie zum Maßstab der eigenen Diagnostik machen. Die Möglichkeit, durch die individuelle Suche ach Diagnostikmethoden einen persönlichen Stil zu entwickeln, d. h. jene Problemheuristik und ubjektive Erfahrung sich anzueignen, die ja gerade erst den Experten kennzeichnet, wird so nterbunden oder zumindest doch eingeschränkt.

ls einen weiteren vermeintlichen Vorteil von Expertensystemen gegenüber Fachbüchern nennen lancey/ Shortliffe(67) den Umgang mit unsicheren Fakten, der in Expertensystemen wesentlich räziser gehandhabt würde. In Textbüchern werden Unsicherheiten durch vage umgangssprachliche egriffe ausgedrückt, während man in Expertensystemen numerische Werte einsetzt, die als ndikatoren für die Sicherheit einer Tatsache oder Schlußfolgerung gelten. Die Grenze, ab wann ine Schlußfolgerung als gültig angesehen wird, ist präzise determiniert durch die Sicherheits-erte, d.h. numerische Faktoren treten an die Stelle subjektiver Abwägung. Derjenige, der sein Wissen aus Textbüchern bezieht, sieht sich vagen Formulierungen gegenübergestellt und wird onfrontiert mit der Diskussion unterschiedlicher Standpunkte, die jeweils verschiedenen Schulen ntsprechen oder aber auf unterschiedlichen statistischen Erhebungen basieren. In diesem Fall st der Leser zu einem persönlichen Urteil gezwungen, d.h. er muß selbständig abwägen, ab wann r eine Schlußfolgerung für zulässig hält bzw. unter welchen Bedingungen er eine unsichere atsache als gültig begreift. Damit ist ihm ein subjektiver Ermessensspielraum gegeben, der eine

individuelle Stellungnahme in jedem einzelnen Fall erfordert.

Die Gegenüberstellung von Textbüchern und Expertensystemen impliziert noch einen weiteren wichtigen Punkt. Bei der Darstellung von Zusammenhängen und Diagnosen greifen die Autoren von Fachbüchern auf ausführliche sprachliche Erklärungen und graphische Illustrationen zurück. Die Begründungsfähigkeit von Expertensystemen dagegen beschränkt sich auf die Darstellung von Regeln, die im Verlauf der Diagnosefindung vom System benutzt wurden. Die erheblich umfangreicheren Beschreibungen in Büchern ermöglichen dem Leser, sich ein umfassenderes Bild über den Begründungszusammenhang zu machen als dies in einem Expertensystem realisierbar ist. Dagegen bieten die Expertensysteme den Vorteil, daß der Benutzer an beliebigen Punkten im Verlauf eines Entscheidungsprozesses nach Erklärungen fragen kann, eine Möglichkeit, die in Textbüchern nicht vorhanden ist. "You cannot pose hypothetical questions or give it new knowledge and see how the answer changes" (68). Dennoch sollte nicht übersehen werden, daß die Erklärungsfähigkeiten bislang existierender Computerprogramme noch minimal sind, d.h. Fachbücher in den meisten Fällen erheblich umfassendere Argumentationen liefern, die eben jene, so unabdingbar notwendige subjektive Stellungnahme herausfordern.

Zusammenfassend darf man sagen, daß wohl beide Formen der Vermittlung von Expertise ihre Berechtigung haben und Expertensysteme durchaus neben den Fachbüchern als "knowledge repositories" (69) fungieren sollten. Als hervorzuhebender Vorteil von Expertensystemen ist die Unabhängigkeit einer Wissensbasis von ihrem Anwendungszweck zu nennen; d.h. durch die Implementation entsprechender Prozeduren kann eine Wissensbasis in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden, etwa als "intelligent agent - a consultant, tutor, librarian, or decision analyst" (70). Die oben aufgeführten Mängel von Computersystemen gegenüber Textbüchern ließen sich umgehen, beschränkte man von vorneherein die Anwendungsbereiche der Expertensysteme auf die Funktion eines didaktischen Hilfsmittels neben anderen Formen der Wissensvermittlung.

4.4.4 Medizinische Problemlösung: Charakteristika und Realisation im Computer

Die KI-Forscher, deren Ziel die Entwicklung intelligenter Computersysteme für die Medizin ist, haben sich relativ differenziert mit der klinischen Entscheidungsfindung von Menschen auseinandergesetzt. Um die Spezifika der medizinschen Problemlösung in Computerprogramme zu implementieren, bedurfte es einer vorherigen sorgfältigen Analyse des menschlichen Entscheidungsverhaltens. Gorry (71),einer derjenigen, die sich am intensivsten um die Klärung dieser Probleme bemühte, entwickelte folgendes Konzept, das von ihm selbst als reduzierter Entwurf angesehen wurde. Ausgehend von den Informationen, die ein Arzt/eine Ärztin durch die Anamneseerhebung über den Patienten erfährt, wird eine Hypothese über die mögliche Erkrankung aufgestellt. Zwei Alternativen eröffnen sich dem Diagnostiker, um diese Hypothese zu verifizieren oder zu falsifizieren:

1. er versucht, mehr Informationen über den Patienten zu erhalten;
2. er unternimmt versuchsweise eine Therapie, die auf der Verdachtsdiagnose gründet und nimmt das Risiko der Fehldiagnose in Kauf.

Dieses Modell erwies sich als zu verkürzt, um den klinischen Entscheidungsprozeß maschinell nachahmen zu können. Man erkannte, daß die typische Situation eines Mediziners in der Interpretation klinischer Daten und Symptome liegt, auf deren Grundlage die Diagnose bzw. Diagnosehypothese gestellt wird. Bei der Interpretation der vorfindbaren Symptomatik greift der Arzt auf sein erworbenes Wissen zurück. Er wägt die Wahrscheinlichkeiten einzelner Erkrankungen in Abhängigkeit zu den aufgetretenen klinischen Zeichen ab und bringt sein Basiswissen über pathophysiologische Abläufe in den Entscheidungsprozeß mit ein. Die Schlußfolgerungen, die ein Kliniker bei der Beurteilung eines Patienten vollzieht, sollen in Expertensytemen eine zentrale Funktion übernehmen; "The inference function of the program is the analogue of this capability in the physician" (72). Berücksichtigt werden muß jedoch auch das Faktenwissen, über das ein Arzt verfügt und das die Grundlage seiner Entscheidungen und Schlußfolgerungen bildet. Expertenwissen wird damit als faktisch und prozedural eingeordnet; diese Annahme bewirkte die Selektion entsprechender Strukturen zur Wissensrepräsentation (Produktionsregeln und Semantische Netze). Auch die Besonderheit des medizinischen Fachgebiets, in dem sich selten Fakten und Ableitungen mit letztgültiger Sicherheit festlegen lassen, wurde berücksichtig durch die Impelentation der Unsicherheitsfaktoren, die an Fakten und Konklusionen geknüpft wurden und ein Maß für die Plausibilität einer Konklusion darstellen sollen.

Ein anderer Ansatz zur Analyse des medizinschen Entscheidungsverhaltens wurde von Pauker(73) vorgenommen. Auf der Basis langwieriger Beobachtungen und Befragungen versuchte man die Grund-

für die Entwicklung eines Computerprogramms zur Simulation medizinischer Problemlösung zu ffen. Das so entstandene System PIP (74) war zunächst als Programm konzipiert, das von einer ankung des Patienten (hier zunächst Ödeme) ausgehend das medizinische Entscheidungsverhalten lieren sollte. Entsprechend der Vorgehensweise eines Arztes erfolgt in PIP zunächst die neseerhebung, indem vom Benutzer alle wichtigen Daten des Patienten erfragt werden. Auf der llage der so eruierten Daten bildet das System unter Zugriff auf seine Wissensbasis Diagnopothesen, die nach ihrer Wahrscheinlichkeit gewichtet sind. Die Hypothesenbildung erfolgt falls in vermeintlicher Analogie zum Menschen. Man differenziert so bei der Wissensbasis chen "Kurzzeit"- und "Langzeitgedächtnis". Sind nun anamnestisch die Daten eines Patienten ben worden, überprüft PIP in seinem als "Langzeitgedächtnis" bezeichneten Wissensspeicher hier verankerten Frames und selektiert all diejenigen, die in hohem Maße mit der Symptomades jeweiligen Patienten übereinstimmen. Diese Frames werden in das "Kurzzeitgedächtnis" von übertragen, wobei assoziierte Frames ebenso übertragen werden können. Die Frames enthalten rschiedliche Parameter einer Erkrankung, etwa Labordaten, äußere Erscheinungsmerkmale, ntenbefinden etc... Die Frames, die in das "Kurzzeitgedächnis" übertragen wurden, werden mit den Daten des Patienten verglichen, wobei unzureichende Informationen erfragt werden. Frame mit dem höchsten Grad an Übereinstimmung mit den aktuellen Patientendaten gilt als die nkung, die der hypothetischen Diagnose entspricht.

Realisierung des Systems PIP erbrachte für die daran beteiligten Forscher einige grundle- le Erkenntnisse über die Besonderheiten der medizinischen Expertentätigkeit, die in späteren utersystemen berücksichtigt wurden. Pauker und andere(75) äußerten die Überzeugung, daß der rte in der Praxis oftmals gänzlich anders seine Diagnosen findet, als dies in Textbüchern hrieben ist; "real- world clinician seems to rely much more heavily upon "guessing" the cial hypothesis typically being based on precious little data" (76). Experten sind dazu in Lage, auf der Grundlage nur minimaler Kenntnisse über die Symptomatik eines Patienten ad hoc e globale Hypothese zu formulieren, welche die Anzahl möglicher Erkrankungen des jeweiligen ienten sofort drastisch einschränkt. Der Mechanismus, der dieser Präselektion zugrunde liegt, die Autoren, ist eine Suche nach Mustern klinischer Symptome, die mit bestimmten Krankheitsdern korrelieren. Diese Vorab-Hypothesen werden nun überprüft, indem bislang unbekannte ten des Patienten, die für die angenommene Erkrankung typisch sind, ermittelt werden. erten zeichnen sich zudem dadurch aus, daß sie neben den präselektierten Hypothesen stets h einige andere im Hinterkopf haben, die dann einer sofortigen Überprüfung unterzogen werden, n sich die primären Hypothesen als inkompatibel mit den Daten des Patienten erwiesen. Der gang der Präselektion von Hypothesen und ihrer anschließenden sorgfältigen Überprüfung wurde System PIP insofern nachgeahmt, als unmittelbar nach Erfragen der wichtigsten Patientendaten e Vorauswahl von Frames aus dem sogenannten "Langzeitgedächtnis" stattfindet, der eine laillierte Überprüfung nachfolgt. Die Fähigkeit von Experten, assoziative Verknüpfungen schen einzelnen Hypothesen vorzunehmen, wird ebenfalls simuliert, indem kausale Vernetzungen schen den Frames implementiert werden, die systeminterne Hypothesenverkoppelung ermöglichen.

Beispielsystem PIP und die sich daran anknüpfenden Überlegungen seiner Entwickler über die der medizinischen Entscheidungsfindung macht den potentiellen Wert derartiger Programme tlich. Die Notwendigkeit, sowohl bei der Entwicklung als auch bei der späteren Evaluation rgfältige Überlegungen über klinische Problemlösungsmethoden anzustellen, hat vermutlich einen fruchtenden Effekt auf die innerwissenschaftliche Theoriebildung und Selbstdarstellung. steme wie PIP, die explizit mit dem Ziel entwickelt wurden, die klinische Entscheidungsfindung simulieren, sind in dieser Hinsicht sicherlich besonders wertvoll.

cht unerwähnt bleiben soll bei der Darstellung allgemeiner Charakteristika von medizinischen ertensystemen das Bemühen um eine Evaluation der Systeme. Unproblematisch war bei nahezu len entwickelten Expertensystemen aus dem Bereich der Medizin die Auswertung hinsichtlich der alität der erzielten Diagnosen. Hier erwiesen sich fast alle Systeme als so gut, daß sie mit n Niveau von Experten des jeweiligen Fachs gleichgestellt wurden. Als weitaus schwieriger ellte sich die Evaluation der Akzeptanz derartiger Systeme bei den potentiellen Endbenutzern r. Dabei wurden didaktische Systeme im allgemeinen eher akzeptiert als reine Konsultationssteme (77). Vorrangige Bedingung für die Annehmbarkeit eines Expertensystems in der Medizin t dessen Erklärungsfähigkeit. Ein System muß demnach dazu in der Lage sein, den systemintern llzogenen Lösungsweg dem Benutzer transparent zu machen und einzelne Entscheidungsschritte zu gründen. Bei weiteren Kriterien, unter denen medizinische Expertensysteme von Ärzten akzepert werden, steht die Nützlichkeit des Programms im Vordergrund, d.h. das System soll dem inischen Bedarf entsprechen und den Bereich betreffen, für den die maschinelle Assistenz vom iniker gewünscht wird. Weiter muß ein akzeptables Expertensystem Zeitersparnis für den

Anwender bedeuten und benutzbar sein, d.h. schnell, leicht zu bedienen und zugänglich sein. B didaktischen Systemen sollte das zu vermittelnde Wissen so klar strukturiert sein, daß de Lernenden ein rascher Überblick über den Problembereich ermöglicht wird. Für die Zukunft wir zur Erniedrigung der Akzeptanzschwelle die Fähigkeit von Expertensystemen anvisiert, daß neu Fakten vom Benutzer selbst in das System eingegeben werden können. Allgemeine Anerkennung be ca. 80% der Benutzer fanden die Systeme MYCIN, PUFF, CASNET und INTERNIST/CADUCEUS vor alle nach der Implementation natürlichsprachlicher Dialog- und Erklärungsfähigkeit der Systeme Gegenwärtig sind die Systeme PUFF, EXPERT und ONCOCYN in routinemäßiger Benutzung(78). Insgesamt gesehen wurden eine nennenswerte Anzahl medizinischer Expertensysteme konzipiert (s Überblick), die eine beachtliche Leistungsfähigkeit aufweisen und in der Qualität ihrer Diagno sen im Durchschnitt dem Niveau der menschlichen Experten gleichzustellen sind. Nichtsdestoweni ger weisen alle gegenwärtig existierenden Programme grundlegende Schwächen auf, die nach der nu folgenden detaillierten Darstellung von zwei Beispielsystemen durch die Gegenüberstellung mi der menschlichen Diagnosefähigkeit ausführlich erläutert werden sollen.

4.5 Prototypisches System: MYCIN

4.5.1 Einleitende Bemerkungen

Um einen Eindruck zu vermitteln, wie die interne Struktur eines Expertensystems beschaffen ist werden im Folgenden zwei Expertensysteme exemplarisch dargestellt: MYCIN und GUIDON. Die Auswah erfolgte unter dem Gesichtspunkt, Prototypen von medizinischen und didaktischen Expertensystemen vorzustellen. Die entscheidenden Fragestellungen die der Analyse eines Expertensystems zugrundeliegen, sind:

1. Wie wird systemintern das Wissen über das Problemgebiet und die Aufgabenstellungen codiert?
2. Wie kommt das System von Annahmen zu Schlußfolgerungen?
3. Wie entscheidet das Programm, welche Ableitung vollzogen werden muß?
4. Wie wird die Erklärungsfähigkeit realisiert?

Im Folgenden sollen diese Aspekte zunaechst durch die detaillierte Darstellung des Systems MYCIN berücksichtigt werden:
Das Expertensystem MYCIN, das der Diagnose und Therapie von Infektionserkrankungen dient, wurde Anfang der siebziger Jahre an der Stanford University von Shortliffe und anderen entwickelt und ist in der Zwischenzeit immer weiter ausdifferenziert worden. "Mycin was one of the first of a new breed of computer systems - systems that step out of the toy worlds of AI into the real world. " (79).

4.5.2 Die Wissensbasis in MYCIN

Die zentrale Komponente von MYCIN ist die Wissensbasis; hier sind sowohl die Fakten und Kausal-zusammenhänge des Problemgebiets verankert als auch Informationen über den Schlußfolgerungspro-zeß. MYCIN verfügt über eine statische und eine dynamische Wissensbasis; während im statischen Wissensspeicher das systemspezifische Wissen über die Diagnose und Therapie bakterieller Infektionskrankheiten verankert ist, wird der dynamische Datenspeicher bei jedem Konsultations-prozeß neu instantiiert. Die statische Wissensbasis wird bei der Entwicklung des Expertensystems von den Konstrukteuren festgelegt; dagegen beinhaltet die dynamische Wissensbasis die aktuellen Parameter eines Patienten, die im Verlauf einer Konsultation vom Benutzer erfragt oder vom System eigenständig inferiert werden.

Die statische Wissensbasis enthält

- Eigenschaftszuweisungen von Parametern
- Eigenschaftszuweisungen von Objekttypen ("contexts")
- Regeln
- Listen. (80)

Jede Eigenschaftszuweisung ist in Form von sogenannten assoziativen Tripeln formalisiert, d.h. jede Tatsache wird durch eine Objekt-Attribut-Wert-Zuordnung gespeichert: z.B.:

Objekt	Attribut	Wert
Fieber	Mitglied von:	Objekttyp Patient

ses assoziative Tripel, (Barr und Feigenbaum (81) sprechen hier von Quadrupeln, da sie den herheitsfaktor, der jeder Wertzuweisung beigeordnet ist, ebenso berücksichtigen) umschreibt e Tatsache, daß der Parameter 'Fieber' ein Mitglied des Objekttyps 'Patient' ist, d.h. immer an instantiiert wird, wenn der Objekttyp 'Patient' aufgerufen wird.

rameter sind also Attribute, die jeweils unterschiedlichen Objekttypen zugeordnet sind; z.B. inhaltet der Objekttyp "Patient" die Attribute 'Name, Alter, Geschlecht". Diesen Attributen rden in jedem Konsultationsprozeß die patientenspezifischen Werte zugewiesen, etwa 'Frau ller, 43, weiblich". Neben diesen aktuell instantiierten Werten sind jedem Parameter und jedem jekttyp weitere Wertzuweisungen zugeordnet, die eine Kontrollfunktion für den systeminternen sungsprozeß übernehmen. Diese zusätzlichen Eigenschaften von Parametern und Objekten beinhaln bespielsweise die Information, ob ein Parameter vom Benutzer erfragt, oder ob er vom System nutzerunabhängig inferiert werden muß. Parameter und Objekttypen sind jeweils unterschiedliche genschaftszuweisungen beigeordnet.
enthält jeder Parameter verschiedene, für ihn allein gültige Eigenschaftsbeschreibungen:

Die Bezeichnung des Objekttyps, dem der Parameter zugewiesen ist (etwa beim Parameter "Name" der Objekttyp "Patient");
. Der Werttyp des Parameters, entweder ein Boolean-Wert (Ja/Nein-Antwort), "single-valued" (eine Antwort) oder "multiple-valued" (mehrere Antworten möglich)(82);
. Die Differenzierung, ob es sich bei dem Parameter um ein erfragbares Attribut handelt oder ob der Wert des Parameters durch den systeminternen Inferenzprozeß ermittelt wird;
. Die umgangssprachliche Übersetzung des Parameters und seiner Werte zur späteren Erklärung und Begründung des Schlußfolgerungsprozesses;
. Eine Liste aller Regeln, die den inferierbaren Wert eines Parameters festlegen können (updated-by-Liste);
. Die Determination, welche Parameter ad hoc vom Benutzer erfragt werden müssen, wenn der Objekttyp, dem sie zugeordnet sind, aufgerufen wird (lab-data);
. Die Festlegung von Bedingungen, wann überhaupt die Überprüfung eines Parameterwertes sinnvoll ist.

ntsprechend sind jedem Objekttyp der statischen Datenbasis von Mycin spezifische Wertzuweisungen beigeordnet:

1. Die Determination des hierarchisch übergeordneten Objekttyps (wird im Problemlösungsbaum als übergeordneter Knoten bezeichnet);
2. Die Festlegung der Zahl der Objekte eines Objekttyps (z.B. Organismus1, Organismus2...);
3. Die Beschreibung der zugehörigen Kategorie klinischer Parameter (s.o.);
4. die Zuweisung von Regelklassen, die auf diesen Objekttyp angewandt werden können;
5. die umgangssprachliche Übersetzung des Objekttyps;
6. Die Festlegung, ob dem Objekttyp Attribute zugeordnet sind, die sofort zu Beginn des Konsultationsprozesses zu bestimmen sind;
7. Die Zuordnung von Fragen nach bislang existierenden Objekten des gleichen Objekttyps.

Diese Eigenschaftzuweisungen von Objekttypen und Parametern bilden die Faktenbasis des statischen Wissensspeichers. Aufbauend auf diesen Fakten wurden in MYCIN als zusätzliche Komponenten der statischen Wissensbasis Regeln implementiert, die den zuvor beschriebenen Produktionsregeln entsprechen und mit denen die Repräsentation der Problemheuristik von Experten realisiert werden soll. Die Regeln haben darüberhinaus eine entscheidende Funktion im Schlußfolgerungsprozeß.

Die Regeln in MYCIN entsprechen in ihrer Struktur den bereits dargestellten Produktionsregeln, d.h. sie haben einen Bedingungs- und einen Schlußfolgerungsteil. Die Prämissen enhalten zumeist drei oder vier Aussagen, die spezifischen Parametern Eigenschaften zuweisen. Zusätzlich ist jeder Regel noch die Information zugeordnet, welcher Regelklasse sie angehört, d.h. auf welchen Objekttyp die Regel angewandt werden kann. Manche Regeln enthalten zudem noch einen Hinweis darauf, ob die Regel vorwärts- oder rückwärtsgerichtet angewandt werden soll.
Der typische Aufbau einer Regel in MYCIN sieht wie folgt aus (83):

```
                    Regel 085
1. Systeminterne Form:
"Premise        (AND  (SAME CNTXT STAIN GRAMNEG)
                      (SAME CNTXT MORPH ROD)
                      (SAME CNTXT COMPROM T)
 Action         (CONCLUDE CNTXT IDENT PSEUDOMONAS TALLY .6)
```

2. englische Übersetzung:

IF 1) THE STAIN OF THE ORGANISM IS GRAMNEG, AND
2) THE MORPHOLOGY OF THE ORGANISM IS ROD, AND
3) THE PATIENT IS COMPROMISED HOST

THEN THERE IS SUGGESTIVE EVIDENCE (.6) THAT THE
IDENTITY OF THE ORGANISM IS PSEUDOMONAS "

MYCIN beinhaltet ca. 450 dieser Regeln, mit denen das diagnostische und therapeutische Wissen eines Experten für bakterielle Infektionen repräsentiert werden soll.

Als viertes Element in der statischen Wissensbasis von MYCIN sind die Listen zu nennen, die Wissen nicht in Form von assoziativen Tripeln enthalten, sondern alle Elemente einer Kategorie in einer Liste zusammenfassen; etwa die Liste aller Organismen, die MYCIN bekannt sind. Diese Listen sind von den Regeln aus durch die Funktion LISTOF unmittelbar erreichbar.

4.5.3 Die dynamische Wissensbasis

Neben der statischen Wissensbasis besitzt MYCIN einen dynamischen Datenspeicher, der jeweils aktuell in einem Konsultationsprozeß neu belegt wird. Diese dynamische Wissensbasis enthält, wiederum in Form assoziativer Tripel:

- die Patientendaten, d.h. die Werte der entsprechenden Parameter (z.B. Nam...);
- die sogenannten dynamischen Daten, die den Weg beinhalten, wie die einzelnen Parameterwerte evaluiert wurden;
- die Eigenschaften derjenigen Objekttypen, die für den Entscheidungsprozeß notwendig sind;
- Informationen über den "context tree", d.h. den Problemlösungs- oder Kontrollbaum.

Die Patientendaten werden unmittelbar zu Beginn einer Konsultation im dynamischen Datenspeicher verankert; z.B.:

Patient1	Sex	Male
Patient1	Allergies	(Penicillin, Ampicillin)

Jedes Mal, wenn ein neuer Objekttyp im Verlauf der systeminternen Problemlösung aufgerufen wird, werden ad hoc all diejenigen Patientenparameter, die eine entsprechende Wertzuweisung im statischen Wissensspeicher haben, vom Benutzer erfragt im dynamischen Datenspeicher abgelegt. Zusätzlich werden alle inferierten Parameterwerte hier gespeichert, so daß im Verlauf des Konsultationsprozesses ein patienspezifischer "context" (84) entsteht, auf dessen Basis Diagnose und Therapieempfehlung ausgegeben werden können.

Die dynamischen Daten beinhalten darüberhinaus präzise Informationen darüber, wie jeder einzelne Wert eines Parameters gefunden wurde; d.h. sie beinhalten genau die Regeln, deren Anwendung zuen einzelnen Objekttypen gestellt werden, ob mehrere Objekte in einem Objekttyp auftreten können und wie diese numeriert werden, um sie voneinander unterscheiden zu können. Die Informationen über den "context tree"(85), die ebenfalls im dynamischen Datenspeicher verankert sind, legen die Grobstruktur des Lösungsbaumes fest, der als Kontrollinstrument bei der systeminternen Entscheidungsfindung dient. Jedem Objekttyp dieses Lösungsbaumes - man kann diese auch als Knoten eines Suchbaumes begreifen - werden drei Werte zugewiesen, die seinen Platz im Lösungsbaum markieren:

- der Objekttyp
- der hierarchisch übergeordnete Objekttyp oder Knoten ("parent")
- die hierarchisch untergeordneten Objekttypen / Knoten ("descendants-of")(86).

Dieser bei jeder Konsultation neu gebildete Lösungbaum dient als Leitlinie für die Entscheidungsfindung in MYCIN, da bei jeder Parameterbestimmung immer zunächst nach den zugehörigen Objekttypen gesucht wird, deren strukturelle Abhängigkeiten durch den "context tree" festgelegt sind und die so in einer schlüssigen Abfolge bearbeitet werden können.

5.4 Die Problemlösung in MYCIN

ne wesentliche Grundlage der Entscheidungsfindung in MYCIN ist die Bestimmung von Parameter-
rten. Diese Werte können ermittelt werden, indem einerseits Fragen an den Benutzer gestellt
rden, andererseits die systemintern gespeicherten Regeln angewandt werden, um den gewünschten
rameterwert zu inferieren. Wie bereits oben bei der Charakterisierung des statischen Daten-
eichers erwähnt, ist jedem Parameter die Information zugeordnet, ob der Parameterwert durch
gen an den Benutzer oder durch Regelanwendungen evaluiert werden muß. Werden die Werte durch
ferenzen ermittelt, so greift MYCIN auf die sogenannte "Updated-By"-Liste(87) zurück, eine
ste, die alle Regeln enthält, die zur Bestimmung des erforderlichen Parameterwertes führen.
ese Regeln enthalten jeweils in ihrem Aktions- oder Schlußfolgerungsteil den gesuchten
rameterwert. Um diesen Wert jedoch als gültig werten zu können, muß MYCIN zunächst die
ämissen der jeweiligen Regeln überprüfen, d.h. die im Bedingungsteil enthaltenen Wertzuwei-
gen mit den aktuellen Daten des Patienten vergleichen. Stimmen diese überein, kann der
tionsteil in Kraft treten; ist jedoch auch nur ein Satz des Bedingungsteils unvereinbar mit
n bislang ermittelten Patientendaten, so wird die Regel sofort verworfen und die nachfolgende
gel der Updated-by-Liste wird angewandt. Wenn die Updated-By-Liste leer ist, ohne daß der
rameterwert festgestellt werden konnte, so wird automatisch eine Frage an den Benutzer
richtet, um so den Wert zu erhalten. MYCIN's Kontrollstruktur: das "backward chaining"

i der Überprüfung des Bedingungsteils der aufgerufenen Regel kann sich ergeben, daß dem System
n Parameter, der in einer Prämisse auftritt, bislang nicht bekannt ist. Damit stellt sich die
twendigkeit, ein Unterziel zu konfigurieren, d.h. nach einer Regel zu suchen, mit der sich der
bekannte Parameter inferieren läßt oder aber, wenn der Paramter ein erfragbarer ist, den
nutzer nach diesem Wert zu fragen. Die Methode, ein Unterziel zu formulieren und Parameter-
rte jeweils durch Anwendung derjenigen Regeln zu ermitteln, in deren Konklusionsteil der
rameter enthalten ist, wird als "backward chaining" oder Rückwärtsverkettung bezeichnet. Das
ackward chaining" charakterisiert eine Suchprozedur, die vom Ziel ausgehend eine rückwärtige
erifizierung von Hypothesen über mögliche Lösungen versucht. Bei MYCIN geht die rückwärtige
che von einer Endregel aus, die beinhaltet, daß ein oder mehrere zu therapierende Organismen
rliegen, so daß im Aktionsteil dieser Regel eine Therapie vorgeschlagen werden kann. Um diese
dingung der Endregel zu überprüfen, muß MYCIN jedoch Kenntnis über die Organismen des jewei-
gen Patienten haben. So ist die Überprüfung der Prämissen dieser Endregel Ausgangspunkt für
ie Rückwärtsverkettung im weiteren Schlußfolgerungsprozeß.

urch die Implementation des "backward chaining"- Algorithmus wird gleichzeitig die Kontroll-
truktur für MYCIN festgelegt. Wie oben bereits erwähnt, dienen die Kontrollmechanismen der
uswahl problemadäquater Regeln. Dies wird durch die Rückwärtsverkettung gewährleistet, indem
ur diejenigen Regeln Anwendung finden, in deren Schlußfolgerungsteil sich der zu bestimmende
arameterwert befindet; es findet somit eine Einschränkung des Suchprozesses durch die Selektion
eweils passender Regeln statt. Als weiterer Eingrenzungsfaktor ist die Kategorisierung der
egeln zu nennen. Indem jede Regel in eine, höchstens zwei Regelklassen integriert wird, die
eweils einem Objekttyp zugeordnet sind, kann sie nur bei spezifischen Parametern Anwendung
inden.

ur Verdeutlichung des Prinzips der Rueckwaertsverkettung in MYCIN diene - um der Verstaendli-
hkeit willen - folgendes Beispiel aus einem angenommenen System:

nwendungsgebiet: Autoreparatur
usgangszustand: Auto springt nicht an
ystemhypothese: die Batterie ist defekt

as System arbeitet nun folgendermaßen:

. Suche nach einer Regel, in deren Aktionsteil "Batterie defekt" enthalten ist. Das System
indet in
der "Updated-By-" Liste dieses Attributes zunächst Regel Nr. 20

egel Nr. 20

enn 1. die Lichter nicht funktionieren , und
2. die Batterie alt ist
ann ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 60% (.6) die Batterie defekt

2. Nun erfolgt eine Überprüfung der ersten Prämisse der Regel Nr. 20, "die Lichter funktionieren nicht". Da diese Tatsache dem System bislang nicht bekannt ist, muß es nun nach einer Regel suchen, die diese Tatsache in ihrem Aktionsteil enthält, d.h. die erste Regel der "Updated-by"-Liste dieses Parameters, hier Regel Nr.11 anwenden.

Regel Nr. 11

Wenn 1. die Zündung an ist, und
2. der Lichtschalter an ist, und
3. die Lichter nicht leuchten
Dann funktionieren die Lichter nicht.

Verkürzende Annahme:
alle drei Prämissen von Regel Nr. 11 sind erfragbare Parameter, d.h. können vom System durch Fragen an den Benutzer direkt ermittelt werden. Man nehme an, daß sich bei der Beantwortung der Frage die Gültigkeit aller Prämissen ergäbe, so daß die Regel Nr.11 als korrekt angesehen werden kann; daraus folgt: die erste Prämisse von Regel Nr. 20, der Ausgangsregel, ist gültig.

Nun erfolgt im nächsten Schritt die systeminterne Überprüfung der zweiten Prämisse von Regel Nr. 20. Dies impliziert die Anwendung der ersten Regel der "Updated-By"-Liste des Parameters "Batterie alt", d.h. einer Regel, in deren Aktionsteil die Wertzuweisung "alte Batterie" vorgenommen wird.

Regel Nr. 17

Wenn 1. die Batterie länger als zwei Jahre nicht gewechselt wurde
Dann ist die Batterie alt.

Die Prämisse der Regel Nr. 17 wird nun durch neue Regelanwendungen ebenfalls in Form des backward chaining evaluiert. Nimmt man an, daß sich bei diesem Überprüfungsvorgang die Richtigkeit der Prämisse von Regel Nr. 17 ergibt, dann gilt Regel Nr. 17 und als Konsequenz die zweite Prämisse der Regel Nr. 20. Beide Prämissen haben sich somit als korrekt erwiesen, so daß die Schlußfolgerung, "Batterie defekt", vom System als gültig angesehen werden kann.

4.5.5 Funktionen

Spezielle Funktionen, die in MYCIN implementiert wurden, dienen der Evaluation von Regeln. Hier sollen lediglich die beiden wichtigsten Funktionen "SAME" und "CONCLUDE"(88) vorgestellt werden, die in fast allen Regeln verankert sind (siehe folgendes Beispiel):

```
"PREMISE        (AND  (SAME CNTXT STAIN GRAMNEG)
                      (SAME CNTXT MORPH ROD)
                      (SAME CNTXT COMPROM T)
 ACTION         (CONCLUDE CNTXT IDENT PSEUDOMONAS TALLY.6)"
```

Die Funktion SAME beinhaltet die Überprüfung der Parameterwerte von Regeln. SAME vergleicht die zuvor eingegeben Patientendaten, sofern diese sich bereits im dynamischen Datenspeicher befinden, mit der Regelprämisse und gibt als Resultat entweder den Wert "false"(89) aus, falls Patientendaten und Prämisse nicht übereinstimmen, oder aber den Sicherheitswert, mit dem die Prämisse als wahr gelten kann. (Auf die Sicherheitswerte wird später noch eingegangen). Enthält der dynamische Datenspeicher keine Informationen über den erforderlichen Parameterwert, so tritt, wie oben bereits ausgeführt, die Rückwärtsverkettung in Kraft, und es wird versucht, den notwendigen Parameterwert zu eruieren.
Die Funktion CONCLUDE, die im Schlußfolgerungsteil der Regeln auftritt, gewährleistet die Übertragung des jeweils ermittelten Parameterwertes in den dynamischen Datenspeicher und aktualisiert somit die Patientendaten durch Hinzufügung jedes neu gefundenen Wertes.

4.5.6 Die Sicherheitsfaktoren

In der Medizin können viele Angaben, wie z.B. die Identität eines Organismus oder die Wirksamkeit von Medikamenten, nicht mit letztgültiger Sicherheit gemacht werden. Schlußfolgerungen sind manchmal nur Vermutungen, so daß für Diagnosehypothesen eine Einschätzung über das Maß

Verläßlichkeit erforderlich ist. Um dieser Besonderheit des Problemgebiets Rechnung zu n, wurden in MYCIN sogenannte Sicherheitsfaktoren ("certainty factors" (90)) implemen-, mit denen man versucht, unsicheres Wissen zu repräsentieren. Die Sicherheitsfaktoren sind ische Werte, die von -1 (falsch) bis +1 (richtig) rangieren(91). In MYCIN wird ein Sicher-wert durch folgende Faktoren determiniert: Für jede Aussage werden zwei numerische Werte gelegt; ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Aussage (MB) und ein Maß für die Nichtwahr-nlichkeit der gleichen Aussage (MD). Mit beiden Werten wird der Grad der Wahrscheinlichkeit Nichtwahrscheinlichkeit einer bestimmten Hypothese festgelegt. MB und MD werden durch ln bestimmt:

$$MB(h,e) = \frac{\max(P(h:e),P(h))-P(h)}{\max(1,0) - P(h)}$$

= proportionale Abnahme des Mißtrauens von h

$$MD(h,e) = \frac{\min(P(h:e), P(h)) - P(h)}{\min(1,0) - P(h)}$$

= proportionale Abnahme des Zutrauens von h

beiden Werten wird der Certainty-Faktor gebildet:

,e) = MB(h,e) - MD(h,e)

infacht ausgedrückt:

Maß für den Grad an Vertrauen in eine Hypothese;
Maß für den Grad an Mißtrauen gegenüber einer Hypothese
= MB - MD , d.h., die Differenz bildet den Sicherheits-faktor (92).

st positiv, wenn die Hypothese eher als wahr betrachtet wird, und negativ, wenn sie eher als ch angesehen wird. Zusätzlich ist durch komplexe Formeln die Wahrscheinlichkeitsfestlegung ich, wenn die Wahrheit einer Hypothese durch mehrere Faktoren bestimmt wird. Der größer lende CF-Wert entspricht der höheren Sicherheit einer Hypothese durch das Zutreffen mehrerer ingungen. "The uncertainties introduced at each step along the way can be combined to produce easure of the overall certainty of the final hypothesis"(93).

Werte MB und MD sind keine statistisch ermittelten Werte, sondern entstammen subjektiven ätzungen der Experten; gleiches gilt für die Sicherheitsfaktoren der einzelnen Parameter und die generellen Werte, die für jede Regel vorab von den beteiligten Experten festgelegt den. Die Grenze, ab wann eine Hypothese oder eine Schlußfolgerung akzeptiert wird, ist CF ßer 0.2 (94). Schlußfolgerungen mit einem Sicherheitsfaktor, dessen Wert unter 0.2 liegt, den als ungültig verworfen. Als Sicherheitswert des Bedingungsteils einer Regel gilt der inste CF-Wert der Einzelprämissen. Kombiniert mit einem generellen Sicherheitsfaktor, der er Regel beigeordnet ist, ergibt sich der jeweilige CF-Wert für den inferierten Parameterwert wird durch die Funktion CONCLUDE gemeinsam mit dem Parameterwert in der dynamischen Daten-is gespeichert. Wenn ein Parameterwert bereits ermittelt wurde, er sich somit schon im amischen Speicher befindet, so wird der bekannte CF-Wert mit dem neu ermittelten Sicherheits-tor kombiniert, um so der höheren Sicherheit der Parameterevaluation Rechnung zu tragen. wever, the concept of CFs did appear to fit the clinician's reasoning patterns - their gements of how they weighted factors, strong or weak, in decision making" (95).

.7 Der Kontrollbaum

or der Konsultationsverlauf von MYCIN explizit dargestellt wird, soll noch kurz auf den soge-nten "context tree" eingegangen werden. Wie bereits erwähnt, wird die Grobstruktur des ntrollbaums in der dynamischen Datenbasis verankert, indem für jeden Objekttyp (= Knoten des ms) der über- und der untergeordnete Knoten gespeichert wird. Bei jeder Konsultation wird der ntrollbaum neu instantiiert, doch enthält jeder Kontrollbaum immer die drei wichtigsten ten: "Patient", "Culture" und "Organism"(96). Wie oft die beiden letztgenannten Knoten im ntrollbaum auftreten, hängt vom jeweiligen Entscheidungsprozeß ab. Ursprungsknoten ist immer Patienten-Objekttyp. Der "context tree" bildet, global gesehen, den Kontrollrahmen, inner-

halb dessen die Rückwärtsverkettung stattfinden kann. Damit bildet der Kontextbaum eine Repräsentation von Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den einzelnen Objekttypen und übernimmt die Steuerung der Abfolge von Regelanwendungen und Parametersuche.

4.5.8 Die Dialogfähigkeit von MYCIN

Wie bei der Darstellung des systeminternen Schlußfolgerungs-
prozesses deutlich wurde, müssen bestimmte Parameter vom Benutzer erfragt werden, da sich diese nicht vom System inferieren lassen. MYCIN verfügt über die Möglichkeit, einen entsprechenden Dialog mit dem Benutzer in normalem Englisch zu führen. Dies wird realisiert, indem jedem Parameter, der erfragt werden muß, in der statischen Datenbasis die Frage an den Benutzer in normalem Englisch zugeordnet ist. Diese natürlichsprachlichen Übersetzungen der Fragen werden auch bei der Darlegung des Schlußfolgerungs- prozesses verwandt.

Im Folgenden soll illustrativ ein kurzer Ausschnitt aus einem Dialog mit MYCIN vorgestellt werden, um die Fähigkeiten dieses Expertensystems zu demonstrieren.

——PATIENT-1——

1) Enter the patient''s name
: Smith
2) Age
: 23
3) Sex
: male
4) I will refer to the first positive culture obtained for Smith (PATIENT-1) as:

——CULTURE-1——

5) From what site was the specimen for CULTURE-1 taken?
: blood
6) Please give the number of days since the BLOOD culture (CULTURE-1) was obtained?
: 2
7) I will refer to the first offending organism from the BLOOD culture (CULTURE-1) as:

——ORGANISM-1——

8) Enter the identity (genus) of ORGANISM-1
: unknown
9) The stain (Gram or Ziehl-Neelson Acidfast) of ORGANISM-1 is ?
: gramneg
10)Is ORGANISM-1 a coccus or a rod (etc)?
: rod
11)Did ORGANISM-1 grow aerobically?
: y
12)Did ORGANISM-1 grow anaerobically?
: y
13)What was the suspected portal of entry of ORGANISM-1?
: unknown
14)Is there evidence that Smith (PATIENT-1) has Meningitis?
: y
15)Were any organisms that were significant (but no longer require therapeutic attention) isolated
within the last approximately 30 days?
: y

Der Dialog wird fortgeführt, indem allen weiteren Kulturen und Organismen Werte zugewiesen werden. Es wird ersichtlich, wie MYCIN im Dialog die notwendigen Werte zur Instantiierung des Kontrollbaumes erfragt, die dann im dynamischen Datenspeicher abgelegt werden.

) Die Erklärungskomponente in MYCIN

i der Wissensbasis, der Inferenzkomponente und der Benutzerschnittstelle stellt das Erngsmodul eine weitere wichtige Grundlage eines effizienten Expertensystens dar. Für die otanz von MYCIN als Diagnose- und Therapiesystem bei den Ärzten ist die Transparenz des emintern vollzogenen Lösungsweges geradezu von elementarer Wichtigkeit. Ärzte dieses und i anderen Fachgebietes müssen dazu in der Lage sein, den Lösungsweg zu verfolgen, um die nose annehmen oder zurückweisen zu können. Auch für die Evaluation des Systems ist die isentation des Inferenzprozesses relevant, um Fehler in der Programmlogik oder der Wissens- s zu identifizieren. Darüberhinaus kann mit Hilfe der Erklärungskomponente die Grundlage für Akquisition neuen Wissens gelegt werden, d.h. die Implementation neuer Regeln oder Objekt- enschafts- zuweisungen. Die Erklärungen des Systems sollten möglichst in natürlicher Sprache lgen, um die Verständlichkeit der Darlegung zu gewährleisten. Dies wird in MYCIN realisiert, n, wie oben bereits angedeutet, jeder Objekt- und Parameterbeschreibung wie auch jeder Regel natürlichsprachliche Übersetzung beigeordnet ist.

N besitzt in seiner Datenbasis dynamische Daten, die für jeden determinierten Wert den Weg chern, wie er ermittelt wurde, d.h. entweder ist die an den Benutzer gestellte Frage hier nkert oder aber die Regeln, deren Anwendung zum jeweiligen Parameter führten. Damit verfügt N über genaue Kenntnisse des eigenen Schlußfolgerungsprozesses und kann dem Benutzer jede bezügliche Frage beantworten.
Formen von Fragen stehen im Vordergrung:

ragen nach dem Zweck von Fragen des Systems an den Benutzer ("why");
ragen nach dem Verlauf des Schlußfolgerungsprozesses ("how")(97).

nd der schon bekannten Regel 085 sollen beide Frageformen illustriert werden: Rule 085

```
iise:       (AND(SAME CNTXT STAIN GRAMNEG)
                (SAME CNTXT MORPH ROD)
                (SAME CNTXT COMPROM T)
ion:        (CONCLUDE CNTXT IDENT PSEUDOMONAS TALLY .6)
```

-zu folgendes Beispiel zur WARUM-Frage:

```
itzer fragt MYCIN:
Warum ist es wichtig, nach der Färbung des Organismus zu fragen?"
IN:
Weil diese Information notwendig ist, um auf die Identität des Organismus zu schließen. Ich
wende Regel 085 an, nach der die Identität des Organismus mit einer Sicherheit von .6
Pseudomonas ist, wenn die Färbung gramnegativ ist, es sich bei der Morphologie um
Stäbchenbakterien handelt und der Patient zur Gruppe von Risikopatienten gehört".
```

Beispiel zur WIE-Frage:

```
utzer fragt MYCIN:
Wie wurde die Identität des Organismus als Pseudomonas ermittelt?"
IN:
Es wurde Regel 085 angewandt. Ich konnte den Schluß ziehen, daß es sich bei der Identität des
Organismus um einen Pseudomonas handelt, weil die Färbung gramnegativ ist, es sich bei der
Morphologie um Stäbchenbakterien handelt und weil der Patient zur Gruppe der Risikopatienten
gehört".
```

wird hier deutlich, das MYCIN nicht nur über die natürlich- sprachlichen Übersetzungen der ekt- und Parametereigenschaften und der Regeln verfügt, sondern darüberhinaus minimale achgenerierungsfähigkeiten besitzt, d.h. die zur Beantwortung von Benutzerfragen notwendigen ze bilden kann. Jedoch handelt es sich nur um sehr begrenzte Kenntnisse über die Besonderhei- der normalen Sprache, so daß man das System nicht als sprachverstehend im eigentlichen Sinne eichnen kann.

4.5.10 Das Wissensakquisitionsprogramm für MYCIN: THEIRESIAS

Neben der Erklärungs- und Dialogkomponente besitzt MYCIN durch das Zusatzsystem THEIRESIAS noch ein Wissensakquisitionsmodul, mit dessen Hilfe ebenfalls in natürlicher Sprache neue Fakten oder Regeln in die Wissensbasis von MYCIN integriert werden können. Die Implementation von neuem Wissen erfolgt durch einen "rechnergestützten Dialog mit Experten in einem erzeuge- und-prüfe Zyklus" (98). Beispiele zu den eingegebenen Fakten werden vom System erzeugt und von den beteiligten Experten überprüft. Dieser Vorgang impliziert nicht nur die Überprüfung, inwieweit die Tatsachen korrekt in das System integiert wurden, sondern beinhaltet auch eine Konsistenzanalyse. Wenn sich neu eingegebene Fakten und Zusammenhänge nicht mit der alten Wissensbasis verknüpfen lassen, weil Widersprüche entstanden sind, erfolgt eine Darlegung des aufgetretenen Fehlers vom System an den Benutzer, so daß diesem die Beseitigung des Fehlers möglich wird. Damit übernimmt THEIRESIAS die Rolle, "to guide the expert while he (or she) is determining the source of the reasoning 'bug'." (99).
Die Besonderheit des Systems THEIRESIAS liegt nicht nur in der Fähigkeit, Inkonsistenzen von neuem und altem Wissen aufzudecken, sondern überdies darin, daß der Experte die Neueingaben in natürlicher Sprache tätigen kann; "So wird der Spezialist darin unterstützt, die betreffenden Regeln am Bildschirm in natürlicher Sprache zu ergänzen, zu streichen oder zu ändern" (100). THEIRESIAS übernimmt eigenständig die Übersetzung der natürlichsprachlich eingegebenen Fakten in die LISP- Strukturen der Wissensbasis, also der LISP-Versionen von Regeln und Eigenschaftszuweisungen.

Da das System THEIRESIAS nicht im engen Sinne zu den medizinischen Diagnose- und Therapiesystemen gehört, soll es im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlicher dargestellt werden.

4.6 Prinzipien didaktischer Expertensysteme

4.6.1 Konzepte zum Computereinsatz im Unterricht

Die Idee, Computer zur Vermittlung von Lernstoff einzusetzen, geht bereits auf die frühen sechziger Jahre zurück. Damals bereits wurde die Zielsetzung formuliert, Computer als Medium einzusetzen, das direkt mit dem lernenden Schüler oder Studenten interagiert, ohne daß ein Eingreifen durch Lehrende erforderlich wäre.

Einer der Zugänge zum computerunterstützten Unterricht erfolgte durch das LOGO-Experiment. Sein Begründer, ein Mathematikprofessor am Massachusetts Institute of Technology, Seymor Papert(101), entwickelte ein sogenanntes "ad lib" oder "environmental" Konzept, das einen möglichst unbeeinflußten Zugang zu Computern und damit einhergehend einen eingenständigen Umgang mit Rechnern bei Schülern zum Ziele hatte(102). Ein Schüler oder Student sollte programmieren lernen, um seine individuelle Problemlösungsfähigkeit zu verbessern. Entsprechende Zielsetzungen wurden auch für ein äquivalentes Projekt in der BRD formuliert: "Förderung der Selbständigkeit; Finden eigener Aufgaben und eigener Lösungswege" (103). Allgemein verbreitet wurde dieser Zugang zum computerunterstützten Unterricht vor allem in Großbritannien, wo in verschiedenen Schulen LOGO die Grundlage des Programmierunterrichts darstellt und damit eine zunehmende Bedeutung einnimmt(104).

In einem weiteren Ansatz wird versucht, durch Simulationen und Spielprogramme spezifische Inhalte den Schülern oder Studenten näherzubringen. Durch entsprechende Spiele oder umfangreiche Simulationsprogramme werden Kenntnisse über jene Wissensgebiete vermittelt, die sich in dieser Form in Computern repräsentieren lassen. Gerade die Simulation von kausalen Zusammenhängen oder der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Parameter lassen sich mit Hilfe relativ einfacher Graphikprogramme in Computern hervorragend veranschaulichen (105). Die Simulationsmodelle erlauben meistens einen Eingriff der Lernenden insofern, als diese die Werte von Parametern ändern können, um die daraus resultierenden Konsequenzen zu beobachten und damit grundlegende Kenntnisse über Zusammenhänge verschiedener Faktoren zu gewinnen.

Der dritte Zugang wird mit dem Begriff "computer-assisted instruction (CAI)" (106) umschrieben. Hinter dieser Bezeichnung steht der explizite Versuch, durch den Einsatz von Computern Lernen zu initiieren und zu kontrollieren. In diesem Bereich wird der Einsatz didaktischer Expertensysteme angestrebt, so daß eine ausführlichere Darstellung diesbezüglicher Prinzipien notwendig erscheint.

der CAI-Forschung ist die Entwicklung didaktischer Computerprogramme, mit denen die ittlung von Wissen und die Kontrolle des studentischen Lernvermögens realisiert werden en. Die ersten CAI-Programme waren allerdings kaum mehr als programmierte Lehrbücher oder, Barr, Feigenbaum und Clancey (108),(109) polemisch formulierten, elektronische "page-ners". Einem Drillapparat vergleichbar, wurden Fragen zum jeweiligen Fachgebiet an die lenten gestellt, die von diesen beantwortet werden mußten; dieser Mechanismus funktionierte sehr simplen Algorithmen und ließ dem Benutzer keine Möglichkeit zur Eigeninitiative. Erst den siebziger Jahren wurden leistungsfähigere Computerprogramme konzipiert. Grundlegendes zip dieser neuen Programme war die strikte Trennung des fachspezifischen Wissens von den prozeduren des Programms. Damit wurde erst die Basis geschaffen für eine individuelle assung des Instruktionsablaufs an den Wissenstand des jeweiligen Benutzers. "Research today ses on the design of programs that can offer instruction in a manner that is sensitive to student's strengths, weaknesses, and preferred style of learning" (110).

frühen Programme dieser Art stellten den lernenden Benutzern Fragen zu einem fachspezi-chen Text, die in knapper Form beantwortet werden mußten. Diese Antworten wurden vom System korrekt oder falsch bewertet. Die in dieser ersten Phase der Entwicklung von CAI-Programmen standenen Programme werden als "ad-hoc, frame-oriented (AFO) CAI" bezeichnet(111). Die diesen temen zugrundeliegende wissenschaftstheoretische Position kann am ehesten der Skinner'schen dition des "stimulus-response" - Paradigmas zugeordnet werden. Damit unterschieden sich diese gramme auch nur wenig von gutstrukturierten programmierten Lehrbüchern und waren durch diese etzbar.

zweite Phase der Konzeption von didaktischen Computerprogrammen wird mit dem Begriff owledge-based or intelligent CAI" umschrieben (112),(113); im Folgenden wird die in der schlägigen Literatur verwandte Abkürzung "ICAI" für diese Systeme übernommen. Programme ser Art unterscheiden sich von den früheren dadurch, daß sie, über die Implementation von tenwissen hinausgehend, über Problemlösungsfähigkeiten verfügen, Dialoge mit Studenten führen nen und deren Mißverständnisse und Fehler als Grundlage für einen Entwurf des Instruktions-ans verwerten können.

ersten Programme dieser Art wurden als "generative CAI" bezeichnet(114), da sie Problemfälle m jeweiligen Fachgebiet generieren konnten, deren Lösung Aufgabe der Studenten war. Die chfolgenden Systeme wurden mit einem "computer tutor" verglichen, da diese Systeme über duktive Fähigkeiten wie Menschen verfügen sollten und interaktive Dialoge mit den benutzenden udenten führen konnten, d.h.: "mixed-initiative man-computer instructional dialogues" (115). ch die Fähigkeit zur Interpretation studentischer Fehler ist zu den neuen Möglichkeiten zu hlen; "An intelligent CAI system should be able to make hypotheses based on a student's error story as to where the real source of his difficulty lies"(116).

undsätzlich werden didaktische Programme, die auf KI- Methoden basieren, als weitaus lei-tungsfähiger angesehen als die bisherigen didaktischen Systeme. Besonders kritisiert wird an en herkömmlichen Ansätzen die zu starke Simplifizierung der systeminternen Repräsentation des rnprozesses, da diese Strategien auf der Grundlage von Entscheidungstheorie und stochastischen rnmodellen entwickelt wurden. Erst im Kontext der Künstlichen Intelligenz, so beispielsweise aubsch(117), sei die Basis für die Konzeption von Systemen geschaffen worden, die zumindest in eilaspekten mit der Kompetenz menschlichen Lehrer verglichen werden könnten.

pertensysteme als allgemein anerkannte Resultate der KI- Forschung boten hier den ersten nkreten Ansatzpunkt. Obwohl die meisten Entwickler von didaktischen Systemen vor einer irekten Übertragung der Expertensysteme in didaktische Systeme warnen, benutzte man doch oft eren Wissensbasen und Inferenzmethoden. Allerdings bemühte man sich bei der Konzeption didakti-cher Programme um eine stärkere Angleichung des systeminternen Problemlösungsmechnismus' an ie menschliche Form der Problembewältigung , "to make the line of reasoning more understandable o the student"(118). Ergänzend wurde zudem sogenanntes didaktisches Wissen in die Systeme ntegriert:

- Lehrstrategien,
- Methoden zur Evaluation des studentischen Lernverhaltens und zur Modellbildung über den lernenden Benutzer,
- Wissen über didaktisch orientierte Kommunikationsprozesse.

Diese zusätzlichen Elemente sollen im Folgenden noch detaillierter dargestellt werden, da sie in zusätzliches strukturelles Moment gegenüber den bisher vorgestellten Expertensystemen ufweisen.

4.6.2 Prinzipien von ICAI-Systemen

Barr und Feigenbaum(119) bezeichnen folgende Komponenten als notwendige Elemente eines didakt schen Expertensystems:

1. Problemlösungsexpertise = Wissen, das dem Studenten vermittelt werden soll;
2. Modellbildung über den jeweiligen Benutzer = Indikator für den Wissensumfang des Studenten;
3. Lehrstrategien = Präsentationsform des Wissens gegenüber dem Benutzer, studentenspezifische Aufgabenformulierung,
4. Kommunikationsmodell = Fähigkeiten zur benutzerorientierten Dialogführung, Gewähr für Eingriffsmöglichkeit des Lehrenden.

Die Problemlösungsexpertise eines didaktischen Systems besteht nicht nur in der interne Speicherung von Fachwissen und der Fähigkeit zur benutzerunabhängigen Problemlösung, sonder beinhaltet auch die Kompetenz, Problemfälle aus dem jeweiligen Fachgebiet zu generieren, die vo den Studenten gelöst werden sollen. Hier zeigt sich bereits ein qualitativer Unterschie gegenüber früheren Programmen. Alte CAI-Systeme verfügten lediglich über eine statische Daten basis, in der alle Fakten einer speziellen Domäne verankert waren und auf deren Grundlage Frage und Antworten für den Instruktionsprozeß formuliert wurden. ICAI-Systeme enthalten dagegen auc prozedurales Wissen. Damit ist es möglich, auch Unterziele in einem Problemlösungsprozeß z formulieren. Durch die sinnvolle Aneinanderfügung verschiedener, voneinander abhängiger Aufgabe erhalten die Lernenden einen generellen Überblick über ein Fachgebiet und werden durch dies Form der Instruktion darüberhinaus in die Lage versetzt, Teilaufgaben zu lösen.

Verschiedene Ansätze wurden bislang entwickelt, um prozedurales
Wissen in den ICAI-Programmen zu verankern:

- Produktionsregeln,
- Problemlösungsgrammatiken
- Repräsentation von Wissen auf mehreren Ebenen,
- multiple Repräsentationen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Transparenz des Systems, um zu gewährleisten, daß de Problemlösungsprozeß insgesamt überblickt werden kann. Diese Fähigkeit wird als "articulat expert" bezeichnet. Ein derartiges System muß dazu in der Lage sein, korrekte Entscheidungen i einer Form zu begründen, die angelehnt ist an die menschliche Art der Problemlösung(120). Dies Zielsetzung setzt eine Angleichung des systeminternen Reasoningprozesses an das Entscheidungs verhalten von Menschen voraus, ein Kriterium, das in allen didaktischen Systemen erfüllt sei sollte.

Ebenfalls von großer Wichtigkeit ist die Fähigkeit, eine Modellbildung über den Kenntnisstan des jeweiligen Studenten realisieren zu können. "The modeling module represents the student' understanding of the material to be taught" (121). In früheren CAI-Systemen versuchte man, durc die Implementation stochastischer Lernmodelle eine derartige Intention zu realisieren, inde zuvor Wahrscheinlichkeiten für studentische Antworten festgelegt wurden und die jeweils aktuel len Beantwortungen mit diesen verglichen wurden. Diese Methode offenbart jedoch nicht, inwiewei ein Student über wirkliches Verständnis des Fachgebiets verfügt. KI-Techniken zur Entwicklun von Studenten-Modellen umfassen demgegenüber folgende Mechanismen:

1. Mustererkennungsalgorithmen, die einen Vergleich zwischen den internen Informationen und den studentischen Antworten ermöglichen;
2. Indizierungsmethoden in semantischen Netzwerken und Produktionssystemen. Prinzip ist der Vergleich zwischen den studentischen Antworten und der systemspezifischen Expertise; " In these ICAI systems, a student model is formed by comparing the student's behavior to that of the computer-based 'expert' in the same environment"(122). Dieses von Goldstein und Carr(123) als "overlay model" bezeichnete Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß die computerinterne Expertise als Maßstab dafür gilt, inwieweit ein Student das Wissensgebiet beherrscht; "the student's understanding is represented completely in terms of the expertise component of the program"(124).

Letztlich wird damit das studentische Wissen unter dem Aspekt der Abweichung oder Dysfunktio gegenüber dem maschinellen Expertenwissen begriffen; "a perturbation of or deviation from the expert's knowledge - a "bug"." (125). Deutlich wird damit, daß das systemintern gespeicherte

rtenwissen der Maßstab ist, nach dem die Beurteilung des studentischen Wissensstandes enommen wird und die Modellbildung über den einzelnen Lernenden erfolgt. Das Modell über n Studenten beinhaltet noch weitere Informationen:

e Interaktionsgewohnheiten des Benutzers,
n Wissensstand,
.e besondere Speicherung von Fakten, die ein Student oft vergißt,
.e Pläne und Lernziele des Studenten.

Modellbildung über die studentische Kompetenz erweist sich in der Praxis oft als schwer ıares Problem; grundsätzlich kann man vier Methoden unterscheiden:

lie implizite Modellbildung, d.h. ein didaktisches Programm muß dazu in der Lage sein, eine lbschätzung des Problemlösungsverhalten von Studenten vorzunehmen und ein darauf basierendes lodell zu entwickeln. Dieser Ansatz erweist sich jedoch bei der Realisierung als äußerst schwierig, da Programme nicht über Verständnis des Problemfeldes verfügen, d.h. darauf beschränkt sind, die studentische Kompetenz zu schätzen.

Explizite Modellbildung: hier erfolgt der Entwurf eines Modells durch explizite, an den eiligen
Benutzer gestellte Fragen, wobei das Resultat der Antworten als Maßstab für die Bewertung der studentischen Kompetenz gilt.

"Historische Modellbildung"; der Student muß auf der Grundlage seiner bisherigen Erfahrungen

dem spezifischen Problemgebiet des didaktischen Programms eine subjektive Einschätzung seines Wissensstandes vornehmen. Dies erfolgt durch die Einordnung auf einer Skala, deren Level vom Anfänger bis zum Experten reichen.

Strukturelle Modellbildung, d.h. die studentische Kompetenz wird nach der Schwierigkeit der bewältigten Aufgaben eingeschätzt. Dies setzt jedoch voraus, daß im Programm Annahmen über den Schwierigkeitsgrad einzelner Aufgaben existieren.

ı weiteres innovatives Element der neuen ICAI-Systeme ist der Versuch, Fehleinschätzungen bei r Planung der Aufgabenlösung von Studenten zu bemerken, um so die aufgetretenene Fehler undsätzlich angehen zu können. Diese Fähigkeit ist charakteristisch für einen guten Lehrer, da st durch die Feststellung grundlegender Mißverständnisse beim Erwerb von Kompetenz spätere hler vermieden werden können. " The insight of human tutors apparently results from recog- zing the student's plan and analyzing its difference from the most similar "expert" plan; derlying misconceptions are "inferred" from sequences of "buggy" student plans" (126). tsprechend sollen Problemlösungsvorgänge von Studenten dann unterbrochen werden, wenn ersicht- ch wird, daß sie in die falsche Richtung weisen. Dies wird realisiert über systemintern speicherte Problemlösungen in Form von Baumstrukturen, die einen Vergleich mit der studen- schen Problemleosung auf unterschiedlichen Ebenen erlauben. Bereits hier werden Gefahren utlich. Durch die Verankerung der maschinellen Problemlösungsstrategien im Programm, die dem rgleich mit der studentischen Lösungsmethode dienen, wird verhindert, daß Studenten un- rthodoxe und innovative Lösungswege beschreiten können. Ein Programm ist nicht dazu in der ge, kreative individuelle Lösungen abzuschätzen, da es nicht über ein wirkliches Verständnis r Materie verfügt, also den notwendigen Überblick über ein Fachgebiet vermissen läßt. "Extreme nconsistency or an unexpected demonstration of expertise in solving problems might indicate nat the representation in the program does not capture the student's approach" (127).

.6.3 Das Didaktik-Modul

ie wesentlichste Instanz eines didaktischen Expertensystems ist das Didaktik-Modul. Es beinhal- et vor allem Wissen über den Ablauf und die Form natürlichsprachlicher Dialoge, da diese die asis jeder Instruktion sind. Die Kommunikation mit dem Studenten, die Auswahl der zu lösenden rfgaben, die Betreuung und Kritisierung der Problemlösung, die Präsentation und adäquate elektion von unterstützenden didaktischen Material, all dies gehört zu den Aufgaben eines idaktischen Moduls.

n die Dialogführung und die Aufgabenstellung unter didaktischen Gesichtspunkten optimal zu estalten, bedarf es der Implementation von Wissen über Lehrformen. Diese didaktische Expertise

ermöglicht erst die sinnvolle Interaktion zwischen Wissensbasis, systeminterner Problemlösu und dem Kommunikationsmodell.

Bislang wurden in den "intelligenten" Didaktiksystemen verschiedene Lehrstrategien implem tiert. So sind beispielsweise Lehrmethoden zu nennen, die auf Beratungsmodellen basieren. Die Programme versuchen, das studentische Verständnis zu fördern, indem sinnvolle Aufgabenko binationen gestellt werden und eine Bewertung der studentischen Antwort durch das Syst erfolgt. Diese Einschätzungen des Programms sollen bewirken, daß der lernende Benutzer sowo aus seinen Fehlern, als auch aus seinen korrekten Antworten lernt(128,129).

Einen zweiten Ansatz stellen Lehrstrategien dar, die Fehler von Studenten konstruktiv beantwo ten, d.h. die eingeschlagene Methode der Problemlösung bewerten und bessere Wege vorschlage Darüberhinaus wird die Ursache des Fehlers identifiziert und das bisher erworbene Wissen dazu Beziehung gesetzt; d.h. es wird der Versuch gemacht, grundlegende Defizite oder Fehlannahmen bereits erlernten Stoff herauszufinden. (130). "This new direction is based on attempts to ma a bug constructive by establishing for the student that there is something suboptimal in h approach, as well as giving enough information for the student to use what he already knows focus on the bug and characterize it so that he avoids this failing in the future"(132). M nimmt an, daß durch die Gegenüberstellung der studentischen Fehler mit dem systeminterne korrekten Problemlösungsvorgang grundlegende Verständnisdefizite evaluiert und Hilfen f richtige Lösungen gegeben werden können.
Ein weiteres Lehrkonzept in ICAI-Systemen besteht darin, den Studenten zu ermutigen, se eigenes Wissen zu "debuggen", d.h. zu korrigieren. Dieser Ansatz setzt voraus, daß rationa Strategien entwickelt werden, mit denen die Überprüfung des erworbenen Wissens durch d Studenten selbst möglich und dieser in die Lage versetzt wird, die Ursachen seiner Fehler u die diesen zugrundeliegenden Wissensdefizite herauszufinden. Diese Strategie wurde im Syst "BIP" angewandt(133).

Brown und andere(134) formulieren eine noch weitergehende Zielsetzung; sie intendieren d Analyse der Methoden, die Studenten bei der Bildung und Überprüfung einer Lösungshypothe anwenden und welche Strategien angewandt werden, um falsche Hypothesen zu revidieren. Entspr chende Erkenntnisse sollen dann in ICAI-Systeme integriert werden.

Im System "WHY"(135) wurde eine weitere Methode implementiert, die als Sokratische Methode (13 bezeichnet wird. Dieses Konzept strebt eine computerinterne Formulierung der Fragen an, die d Studenten motivieren, über sein eigenes Wissen nachzudenken und dadurch mögliche Mißverstän nisse seines bislang erworbenen Wissens aufzudecken. Diese Methode wird realisiert, indem m Protokolle über Interaktionen zwischen Lehrern und Schülern aufzeichnet, die dann als Grundla der computerinternen Interaktionssteuerung dienen.

Die ICAI-Programme "WEST" und "WUMPUS" beinhalten eine weitere Lehrstrategie; hier wird ve sucht, spielerisch den Studenten das fachspezifische Wissen beizubringen, wobei die Motivati der Studenten durch das Spiel gesteigert werden soll, um den Wissenserwerb zu erleichtern. "In coaching situation, the immediate aim of the student is to have fun, and skill acquisition is a indirecte consequence" (137). Man erhofft, durch dieses spielerische Vorgehen eine höhe Lerneffizienz zu erzielen. Dieses als "coaching" bezeichnete Vorgehen zählt unter den ICA -Methoden zu den favorisiertesten(138).

Grundsätzlich bemüht man sich darum, die verschiedenen Formen dieses didaktischen Wissens Produktionsregeln zu verankern, um somit einen direkten Zugridd auf dieses Wissen zu ermög lichen: "Tutoring rules select alternative dialogue formats on the basis of economy, doma logic, and tutoring or student- modeling goals"(139). Im Folgenden wird in kurzgefaßter Fo ein didaktisches Expertensystem aus der Medizin dargestellt, das System GUIDON, das als Prototy dieser neuen Programme gilt.

4.7 Prototypisches System:GUIDON

4.7.1 Einleitende Bemerkungen

Medizinische Didaktiksysteme beinhalten unterschiedliche Zielsetzungen; allen gemeinsam is jedoch das Bemühen um die Vermittlung medizinischer Kompetenz. Diese läßt sich wie folg unterscheiden:

anipulative Fähigkeiten (Behandlung mit Instrumenten);
nterpersonale Fähigkeiten (Anamnese, Diskussion der Diagnose);
ognitive Fähigkeiten (Datengewinnung, Hypothesenbildung, Test und Therapieplanentwurf)(140).

Vermittlung von kognitiven Fähigkeiten ist vorrangiges Ziel von ICAI-Programmen in der izin. Die meisten Programme präsentieren dem lernenden Benutzer klinische Probleme, die vom denten auf der Basis des erworbenen Wissens gelöst werden sollen. Dabei stellen die diag- tischen Strategien zur Datengewinnung und Hypothesenbildung und -verifikation den Schwerpunkt Instruktionsplans dar.

IDON ist ein Programm zur Vermittlung allgemeiner diagnostischer Problemlösungstechniken und zieller Kenntnisse über Diagnose und Therapie bakterieller Infektionen. Es wurde von Clancey anderen(141) Ende der Siebziger Jahre an der Stanford University entwickelt. Man verwandte Wissensbasis von MYCIN als Grundlage der Systemkonfiguration und implementierte zusätzlich aktisches Wissen und umfangreiche Strategien zur Dialogführung. Die Fähigkeiten von GUIDON Interaktion mit dem jeweiligen Studenten reichen weit über die Möglichkeiten anderer I-Systeme hinaus; während letztere zumeist nur auf die jeweils zuletzt eingegebene Antwort ; Benutzers Bezug nehmen können, vermag GUIDON einen Dialog mit dem Studenten zu führen, der h auf bereits bearbeitete Aspekte zurückgreifen kann. "GUIDON's mixed-initiative dialogue fers from that of other ICAI programs in its um jeweiligen Wert führten oder speichern die ge an den Benutzer, deren Beantwortung den Wert festlegte. Damit ist dem System der unmittel- e Nachvollzug des eigenen Schlußfolgerungsprozesses möglich, und es kann diesen Weg dem utzer sowohl offenlegen als auch Begründungen für die einzelnen Entscheidungen liefern. stimmte Eigenschaften der Objekttypen werden sofort nach ihrem Aufruf festgelegt. Dabei delt es sich etwa um Informationen darüber, ob und wann Fragen an den Benutzer zu dse of olonged, structured teaching interactions"(142). Ebenso ist hervorzuheben, daß GUIDON dazu in r Lage ist, dem studentischen Benutzer ein Feedback über Partiallösungen zu geben, also den agnosefindungsprozeß kommentierend unterstuetzt.

7.2 Die Struktur von GUIDON

s System Guidon verfügt über verschiedene Komponenten; zu diesen zählen:

die fachspezifische Wissensbasis (MYCIN)
die damit gekoppelte Patientenbibliothek, d.h. Fälle, die vom lernenden Benutzer gelöst werden müssen
Wissen über Lehrstrategien und Dialogführung
ein Kommunikationsmodul, bestehend aus dem studentischen Modell und der Möglichkeit, fallspezifische Instruktionen zu generieren.(143)

UIDON eine Trennung der fachspezifischen Wissensbasis von den Lehrstrategien vorgenommen, um as System den individuellen Erfordernissen des Benutzers anpassen zu können. Neben der von YCIN übernommenen Wissensbasis über die Diagnose und Therapie bakterieller Infektionen verfügt UIDON über ca. 200 didaktische Regeln, die Methoden der Dialogführung beinhalten, über Mecha- ismen der Modellbildung über einen Studenten und über Strategien zur Beantwortung studentischer ragen. Die vollzogene Trennung der fachspezifischen Wissensbasis von der didaktischen läßt die öglichkeit offen, Datenbasen zu anderen Problemfeldern mit dem Didaktikmodul zu koppeln.

as fachspezifische Wissen läßt sich nach Clancey(144) in drei Kategorien aufgliedern:

. "performance knowledge", das sind alle Regeln und Tabellen der Wissensbasis von MYCIN. Die egeln von MYCIN wurden nicht modifiziert, jedoch werden sie in GUIDON auf andere Weise benutzt, .h sie fungieren als Basis für die Formulierung der Fragen an den Bnen der Steuerung des ialogs, der Bewertung von Vorgehensweisen des Lernenden und der Modellbildung über das studen- ische Verständnis.

. "support knowledge"; dieses Wissen umfaßt ergänzende Informationen zu den Regeln und Fakten er MYCIN-Wissensbasis; also Informationen, die zur Erläuterung von Zusammenhängen für den tudenten von Wichtigkeit sind. Zur Illustration diene folgendes Beispiel : "Thus the frame ssociated with the factor 'a seriously burned patient' shows that the organsims originate in he air and grow in the exposed tissue of a burn, resulting in a frequently fatal infection" 145). Zu dieser Wissenskategorie zählen auch Definitionen, Rechtfertigungen von Regel- equenzen und Literaturhinweise.

3. "abstraction knowledge"; diese Sparte umfaßt sogenanntes Metawissen, daß für den Instr tionsprozeß als relevant eingestuft wird. Verankert sind hier beispielsweise Abstraktionen Regelmustern und globale Modelle von Regeln, um den Studenten eine strukturelle Orientier zu ermöglichen. Zu dieser Form von Wissen zählen ebenfalls die Fähigkeiten des Systems, Regeln unter dem Gesichtspunkt zu analysieren, welche Unterziele abgearbeitet werden müssen, den Bedingungsteil einer Regel zu evaluieren.

Die Anwendung der Wissensbasis von MYCIN impliziert die Möglichkeit, den jeweiligen Fall, einem Studenten präsentiert wurde, durch MYCIN parallel lösen zu lassen. Die Resultate dies benutzerunabhängigen Problemlösung werden an das System GUIDON in Form eines sogenannt "AND/OR-tree" übergeben. Dieser Baum enthält alle von MYCIN angewandten Regeln und die dara abgeleiteten Schlüsse; GUIDON ergänzt diese Struktur durch die Determination bestimmter Unte ziele, die sich aus den Konklusionsteilen relevanter Regeln ergeben. Diese erweiterte Bau struktur dient als Basis für den Vergleich zwischen der 'Expertenlösung' eines Problems, d der Lösung von MYCIN und der studentischen Lösung. GUIDON nimmt auf dieser Grundlage ei Einschätzung der studentischen Kompetenz vor. Zusätzlich ermöglicht diese parallele Abarbeitu die Konfiguration von Unterzielen im Instruktionsablauf und die Entscheidung, wann und wo d Student einen falschen Weg zur Problemlösung beschreitet.

4.7.4 "Teaching Expertise"

Die Implementation von Wissen über Lehrstrategien in GUIDON erfolgt ebenfalls durch Rege strukturen. Mithilfe derartiger Regeln wird der Vermittlungsprozeß gesteuert und gewährleiste daß die studentischen Bedürfnisse berücksichtigt werden. So existieren beispielsweise Leh regeln, die genaue Anweisungen darüber enthalten, wie auf bestimmte Fragen oder Anweisungen d studentischen Benutzers systemintern zu reagieren ist; d.h. ob etwa bei Anfragen zusätzlic Informationen geliefert werden müssen, ob der programminterne Reasoningprozeß offengelegt werd soll, ob ein anderes Unterziel bei der Problemlösung konfiguriert wird oder wie auf ei Hypothese des Benutzers zu reagieren ist. Folgendes Beispiel für eine Lehrregel diene d Illustration dieser Fähigkeit:

" T-Rule 5.02 (Directly state single, known rule)

IF: 1) There are rules having a bearing on this goal that
have succeeded and have not been discussed, and
2) The number of rules having a bearing on this goal
that have succeeded is 1, and
3) There is strong evidence that the student has
applied this rule
THEN: Simply state the rule and its conclusion" (146).

Hier wird deutlich, daß die "teaching-rules" eine Kontrollfunktion im Vermittlungsproze ausüben, mit denen die Interaktion benutzer- und problemadäquat durchgeführt werden kann.

Die im Folgenden kurz als "T-rules" (147) bezeichneten Regeln über Lehrstrategien beinhalte auch Wissen über die Art der Dialogführung, die ein notwendiger Bestandteil jedes intelligente CAI-Systems sein muß. Das in GUIDON implementierte Wissen über eine benutzerorientierte Dialog steuerung basiert auf den Erkenntnissen Bobrows db(148) und Winograds, die auf folgende Faktore hinwiesen:
- Aktionsmuster müssen im System bekannt sein (wird in GUIDON durch "discourse procedures" realisiert);
- Fachwissen (Inhalt der Dialoge)
- Wissen über die Kommunikationssituation; dies umfaßt das studentische Modell und den Instruktionsplan (149).

Dieses Wissen über eine adäquate Dialogführung ist ebenfalls in Regeln verankert und zählt zu Kategorie der "T-rules". Clancey (150) unterscheidet die "Teaching-Rules" nach zwei Klassen:

1. " T-rules for accumulating belief" - Aktualisierung des studentischen Modells, der Ziel etc...;
2. " T-rules for selecting a discourse procedure to follow" : Auswahl von Prozeduren zu Steuerung des Dialogs unter der Berücksichtigung des studentischen Wissensstandes, de Instruktionsplans und der studentischen Interessen.

obal gesehen obliegt den Lehrregeln in GUIDON damit die Aufgabe, bestimmte Dialogmuster unter ücksichtigung der Erfordernisse des Benutzers auszuwählen, zu entscheiden, ob eine Regel ätzlicher Erläuterungen bedarf, welches Fachwissen zu welchem Zeitpunkt relevant ist und wie ie Überprüfung des studentischen Verständnisses erfolgen kann. Dies impliziert die kontinuier- he Aktualisierung des Kommunikationsmoduls, d.h. das studentische Modell muß stets den ielten Resultaten angeglichen und die Unterziele je nach gebildeten Hypothesen und dem struktionsplan neu formuliert werden.

?.5 Das Kommunikationsmodell

s Kommunikationsmodell von GUIDON beinhaltet verschiedene Komponenten:

. an overlay student model
. a case lesson plan, and
. a focus record." (151)

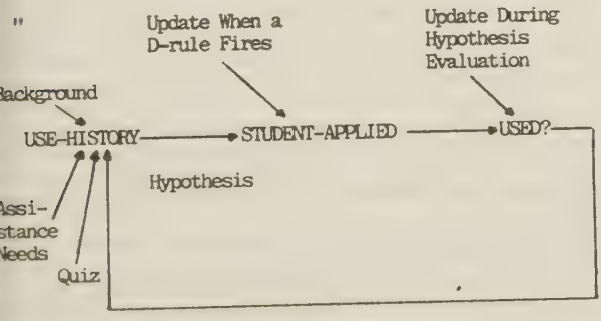
thilfe der hier verankerten Optionen kann jeder Dialog an den Kenntnisstand des Benutzers gepaßt und in Einklang mit dem jeweils zuvor vom System erstellten Instruktionsplan gebracht rden. Die wesentlichste Funktion innerhalb dieses Kommunikationsmodell übernimmt das studenti- he Modell, da die Berücksichtigung der studentischen Kompetenz bei der Dialogführung von tscheidender Bedeutung für die Akzeptanz eines solchen Systems beim Benutzer und für die fizienz der Wissensvermittlung ist.

e Grundlage für die Bildung eines studentischen Modells stellt die Parallelität der Problem- sung durch MYCIN und durch den Benutzer dar. Damit, so nimmt man an, könne zu jedem Zeitpunkt es Instruktionsablaufs eine Einschätzung der studentischen Kompetenz durch die Gegenüberstel- ng mit MYCIN vorgenommen werden. "This record of what the expert (i.e. MYCIN) "knows" at any me during the student-run consultation forms the basis for evaluating a student's partial lutions and providing assistance" (152).
ine derartige Konfiguration des studentischen Modells wird als "overlay model"(153) bezeichnet. ieser Begriff umschreibt die Auffassung, daß das Expertenwissen von MYCIN als Maßstab für die inschätzung studentischer Kompetenz gelten kann, d.h. "the student's knowledge is modeled in erms of a subset and simple variations of the expert rule base" (154). Dahinter verbirgt sich ie Annahme, daß einheitliche Schlußfolgerungschritte in diesem Fachgebiet existieren, die einen erartigen Vergleich und die hier vorgenommene Standardisierung von Kompetenz erlauben.

as Modell über den Kenntnisstand eines Benutzers beinhaltet drei wesentliche Komponenten:

USE-HISTORY
STUDENT-APPLIED
USED?

iese drei Kategorien stehen in Abhängigkeit zueinander, was durch folgende Graphik veranschau- icht werden soll db(155)ec:



Die Kategorie "USE-HISTORY" determiniert den aktuellen Kenntnisstand eines Studenten. Zu Beginn einer Instruktion wird diese Kategorie durch das Resultat eines kurzen Quiz' festgelegt und während des Instruktionprozesses ständig aktualisiert. Sie markiert die Regeln, die als bekannt

vorausgesetzt werden können und beinhaltet Informationen über die Notwendigkeit von Erklärunge
Die zweite Komponente des studentischen Modells wird als "STUDENT-APPLIED" bezeichnet; s
kennzeichnet die Annahme von GUIDON, daß der Student eine bestimmte Regel auch anwenden kan
Diese Fähigkeit unterscheidet sich insofern von der vorherigen Kategorie, als die Anwendu
einer Regel mehr Kompetenz erfordert als das bloße Wissen über deren Inhalt. Jedesmal, wenn
Verlauf des Instruktionsprozesses eine Regelanwendung von MYCIN erfolgt, findet eine Überprüfu
von "STUDENT-APPLIED" an der gleichen Regel statt. Das dritte Element des Modells, "USED?", wi
dann aktualisiert, wenn der Student eine Partiallösung liefert, d.h. eine Hypothese bildet. D
Kategorie "USED?" beschreibt die Annahme des Systems, daß der Student zur jeweiligen Hypothe
eine Regel anführen kann, die seine Partiallösung rechtfertigt. Ist dies der Fall, erfolgt e
internes Feedback an die Komponente "USE-HISTORY", die nunmehr aktualisiert wird.

Die zweite Komponente des Kommunikationsmodells ist der sogenannte "case lesson plan" (156). D
Konfiguration eines Lehrplans wird von GUIDON zu Beginn jedes Instruktionsverlaufs vorgenomm
und dient neben dem studentischen Modell als globale Leitlinie für die Interaktion zwisch
Benutzer und System. Die Bildung dieses Instruktionsplans erfolgt unter mehreren Gesicht
punkten:

- der studentische Kenntnisstand (— studentisches Modell)
- die studentischen Interessen
- die im System verankerte Wichtung von Zielen
- die Wichtigkeit von Unterzielen in Abhängigkeit vom jeweiligen Fall.

Die dritte Komponente des Kommunikationsmodells, der sogenannte "focus record" (157), beinhalte
die studentischen Interessen, die durch die Implementation dieses Faktors mitberücksichtig
werden sollen, um die Motivation des Lernenden zu stabilisieren.

4.7.6 Dialogmodul

Bei der Konzeption des Interaktionsmoduls steht die Berücksichtigung der studentischen Interes
sen im Vordergrund, d.h. es muß darauf geachtet werden, daß dem Studenten ein Freiraum zu
selbständigen Beeinflussung und Steuerung des Instruktions- ablaufes bleibt. "Provision must b
made for every kind of initiative on the part of the student" (158).

Die Interaktionskomponente von GUIDON ist flexibler als in den bisherigen CAI-Programmen. Si
erlaubt dem Benutzer die Rückkehr zu einem bereits bearbeiteten Unterziel, um genauere Detail
vom System zu erhalten, die Wahl eines neuen Ziels im Verlauf der Problemlösung, die Spezifizie
rung des subjektiven Wissensstandes und der Wissensdefizite sowie die Angabe, welche Informa
tionen ignoriert werden können.
Entscheidendes Merkmal der Dialogführung in GUIDON ist die Tatsache, daß diese orientiert ist a
jeweiligen Fall, der dem Studenten präsentiert wird; diese Art des Dialogs wird von (159) al
"case dialogue" bezeichnet. "Because GUIDON attempts to transfer expertise to students ex
clusivly through case dialogues, we call it a case method tutor"(160). Durch die Präsentatio
spezifischer klinischer Fälle wird versucht, dem Studenten Wissen über Diagnosestrategien un
Schlußfolgerungsmöglichkeiten im Bereich bakterieller Infektionen zu vermitteln. Diese Ziel
setzung impliziert verschiedene Notwendigkeiten. So muß gewährleistet sein, daß der Benutzer zu
beliebigen Zeitpunkten um Hilfestellung bitten kann, daß er eigene Hypothesen über eine Lösung
aufstellen kann, die vom System beurteilt werden, daß der Schlußfolgerungsprozeß durch GUIDO
evaluiert wird und vom System Hinweise auf nichtadäquate Lösungswege und unberücksichtigte
Zusammenhänge gegeben werden können. Erreicht wird diese Intention zunächst durch eine Ein
schränkung des Dialogs auf das jeweils aktuelle Ziel, d.h. die Dialogführung kann als "goal-
-directed dialogue"(161) bezeichet werden. Dies bedeutet, daß der Dialog zwischen Benutzer und
System beschränkt ist auf das jeweilige Ziel und nur diejenigen Regeln angewandt und kommentiert
werden, die sich auf dieses Ziel beziehen. Die Zielorientierung des Dialogs hat bestimmte
Voraussetzungen, die erfüllt sein sollten:
- es muß eine Determination aller Fakten vorliegen, die für ein bestimmtes Ziel relevant sind;
- es muß eine Baumstruktur mit Unterzielen für dieses Ziel existieren;
- Fragen oder Hinweise müssen gestellt werden können, die das jeweilige Ziel betreffen;
- es muß eine Zusammenfassung aller evidenten Faktoren existieren, die bereits im Hinblick auf dieses Ziel abgehandelt wurden;
- die Diskussion des Ziels ist erforderlich;
- die Schlußfolgerungen, die zum Ziel führen, müssen dem System vertraut sein, um die studentische Kompetenz einschätzen zu können.

schiedene Strategien und Optionen wurden in GUIDON verankert, um einserseits ein größtmögli- Maß an Initiative seitens des Benutzers und eine weitreichende Stringenz in der Dialog- rung andererseits zu verwirklichen.

Implementation der Fähigkeit von GUIDON, dem Benutzer die Initiative insofern zu überlassen, er bestimmte Bedürfnisse gegenüber dem System artikulieren kann, birgt Probleme in sich, da entsprechenden Eingaben der Lernenden so konfiguriert sein müssen, daß sie vom Programm standen werden. In GUIDON wird diese Kompetenz durch die Verankerung von sogenannten "short- rm options" (162) realisiert. Wie in den meisten ICAI-Programmen erfolgt die Eingabe der denten in Form von kurzen Sätzen. Um die verschiedenen Möglichkeiten der Instruktionssteu- g durch den Benutzer programmtechnisch zu transformieren, wurde ein Menu (mit einer Tabelle gleichbar) im Programm implementiert, aus dem die verschiedenen Optionen in Form von Kurz- mini abrufbar sind. Folgendes Beispiel diene der Erläuterung db(163)ec:

Option type Examples

Get case data	BLOCK, ALLDATA
Information retrieval	PENDING, DETAILS
Dialogue context	RULE, TOPIC
Convey what you know	IKNOW, HYPOTHESIS
Request assistance	HINT, TELLME
Change the topic	DISCUSS, STOP
Special	JUSTIFY, PROFILE"

Interaktion zwischen dem Benutzer und dem System GUIDON basiert auf der Zielsetzung, durch Menu-Vorgaben eine möglichst große Beeinflussung des Instruktionsablaufs durch den Lernenden ermöglichen. Dabei wird zusätzlich angestrebt, das System nicht auf ein passives Informa- nssystem zu reduzieren, das auf Anfrage lediglich die gewünschten Informationen liefert, ndern Erklärungen abgeben kann, die über die bloße Präsentation des systemspezifischen soningprozesses hinausgehen. Dies impliziert beispielsweise die Darstellung von Vorbe- ngungen für eine bereits vollzogene Schlußfolgerung, um die Richtigkeit der bislang voll- genen Schlüsse zu dokumentieren. Ebenso ist GUIDON dazu in der Lage, auf der Grundlage seiner nschätzung des studentischen Wissensniveaus nur dann Erklärungen zu einzelnen Schritten rzunehmen, wenn diese erforderlich sind. So kann GUIDON zwischen verschiedenen Alternativen nlen: "The tutor may want to hold a detailed response in abeyance, simply acknowledge the udent's remark, or probe for a proof" (164). Diese Option verhindert überflüssige Anmerkungen d Erklärungen durch das System, die den Lerndenen demotivieren oder langweilen würden.

7.7 Der Instruktionsprozeß

r Instruktionsprozeß in GUIDON läuft überlicherweise wie folgt ab: Der Student wählt ein obales Problem aus dem Gebiet bakterieller Infektionskrankheiten aus, zu dem er einen Fall arbeiten möchte. GUIDON sucht nun in seiner Patientenbibliothek nach einem entsprechenden Fall d präsentiert dem Benutzer zunächst allgemeine Daten über diesen Patienten. Nun folgen Fragen s Studenten, mit denen er weitere Details über den vermeintlichen Patienten erfährt. Gesetzt n Fall, der Student sei unschlüssig, ist jederzeit die Möglichkeit gegeben, das System um lfestellung zu ersuchen. In diesem Fall selektiert GUIDON intern diejenige Regel, die an dem tsprechenden Punkt des Reasoning-Prozesses relevant ist; hier dient dem System die parallel llzogene Problemlösung in MYCIN als Orientierung. Es folgt eine Erläuterung der Regel, wobei tsprechende "teaching-rules" die Art und das Ausmäß der Regeldarstellung steuern (= Diskurs- zeduren). Dem Studenten werden mögliche Unterziele zur Abarbeitung vorgeschlagen und Fragen den relevanten Regeln gestellt oder es erfolgt lediglich die Präsentation des Schlußfol- rungsteils der jeweils aktuellen Regel. Nach dieser Hilfe durch das System kann der Student in n meisten Fällen eigenständig eine Hypothese über die erwartete Lösung bilden. Diese Hypothese rd vom System evaluiert, indem sie mit der jeweiligen Hypothese von MYCIN verglichen wird und f dieser Grundlage eine Einschätzung des studentischen Kenntnisstandes vorgenommen werden nn. Es folgt eine entsprechende Aktualiserung des Modells, das GUIDON über die studentische mpetenz gebildet hat. Weitere "teaching-rules" entscheiden, ob der Student bei einer korrekten pothesefindung wirklich über das Wissen verfügt, das ihn zu dieser richtigen Lösung brachte der ob es sich lediglich um einen Zufallstreffer handelt. Dies wird dadurch entschieden, daß erprüft wird, ob der Student die Prämissen der Regeln überblickt, die zur hypothetischen chlußfolgerung führten und ob dieser Schluß in Einklang zu bringen ist mit den bislang erfrag- en Patientendaten. Falls die Hypothese des Studenten sich als falsch erweist, wird vom System

die richtige Regel vorgestellt und erläutert, so daß dem Benutzer eine Revidierung der angenom menen Lösung des Problems möglich ist.
Die Dialogkomponente GUIDON's weist trotz ihrer Vorteile gegenüber bisherigen ICAI-System Grenzen auf. Durch den unmittelbaren Vergleich der studentischen Lösungen mit den Resultaten vo MYCIN ist die Evaluation der studentischen Kompetenz sehr eingeschränkt. So werden alle Lösung vom System dann nicht akzeptiert, wenn sich diese außerhalb der strengen Regelstruktur von MYC bewegen, d.h. individuelle und innovative Lösungen werden von GUIDON nicht angenommen. Ebens kann das System dann nicht auf falsche Schlüsse reagieren, wenn diese nicht mit den Regeln vo MYCIN zu fassen sind. Notwendige Hinweise zur Korrektur müssen hier unterbleiben. Weite kritisch anzumerken ist die sehr begrenzte "Verständnis"fähigkeit des Systems. Benutzt bei spielsweise ein Student globale Kategorien, z. B. Kindheit, statt einer numerischen Ziffer, z.B 10 Jahre alt, wird diese Information vom System nicht verstanden, da in den Regeln von MYCIN di Alterszuordnung lediglich numerisch vorgenommen wird. "Modelling medical reasoning in terms o an alternative rule set (not just a subset of MYCIN's rules) is a theory-formation problem tha goes beyond the current capabilities of AI" (165).

4.7.8 Bewertung des Systems

Bisherige ICAI-Systeme in der Medizin beschränkten sich zumeist darauf, Fakten und Entschei dungsregeln der speziellen Domäne zu präsentieren; dies erfolgte auch oft in Ermangelung eine einheitlichen Konzepts für Diagnosestrategien. " There is little agreement among medica educators about an explicit and detailed model of clinical competence"(166). Mit GUIDON wurd erstmalig die Koppelung eines didaktischen Systems mit einem Expertensystem versucht mit de Zielsetzung, das in den Expertensystemen implementierte Wissen über Diagnosestrategien al Modell für den Instruktionsplan zu verwenden. "It is possible that the expert modules o ICAI-systems (for example, the role MYCIN plays in the GUIDON program) will provide usefu testbeds for formalizing and experimenting with problem-solving strategies" (167).

Durch das an GUIDON gekoppelte System MYCIN stehen eine große Anzahl von klinischen Fällen zu Verfügung, die bei der Erprobung und Anwendung von MYCIN gewonnen wurden. Damit kann GUIDON be der Konzeption eines Instruktionsplans direkt auf diese Fälle zugreifen, wodurch nicht nur di langwierige Erstellung eines Lehrplans erleichtert wird, sondern auch der Realitätsbezug gewahr werden kann. Statt der sonst nötigen Frist von ca. einer Woche für die Planung einer Lektion kann mit GUIDON unmittelbar auf die Patientenbibliothek von MYCIN zugegriffen werden; der Bezu zum Klinikalltag bleibt so kontinuierlich gewahrt. "Implicit in the design of most medical CA programs is the assumption that similarity of the tutorial problem- solving environment t actual conditions in actual practice (...) is important to ensure transferability of learning t the clinical setting"(168).

In den meisten ICAI-Systemen bemüht man sich um die Simulation einer realen Interaktion zwische einem Arzt und dem lernenden Studenten. Dies erfolgt über die Nachbildung einer Diskussion übe einen konkreten Fall, wobei die Problemlösungsstrategien gegenüber dem reinen Faktenwissen i Vordergrund stehen. Bislang war es kaum möglich, die Relevanz von Diagnosestrategien im klini schen Alltag bei der Konzeption eines didaktischen Programms ausreichend zu berücksichtigen. Mi der Behandlung realer Fälle einerseits als auch durch die ständige Vergleichsmöglichkei zwischen den Lösungen des Expertensystems und den studentischen Vorgehensweisen andererseit wurde erstmalig ein ernstzunehmender Versuch gestartet, der Wichtigkeit des Problemlösungsver haltens in der Medizin Rechnung zu tragen. Zukünftige Forschung wird in dieser Richtung weite arbeiten müssen.

Die Trennung des Fachgebietwissens von der didaktischen Kompetenz erlaubt die Anwendung vo GUIDON in anderen Problembereichen, deren Wissensbasen sich durch Regeln formalisieren lassen (169). Eine Erprobung dieser Möglichkeit erfolgte bereits mit der Wissensbasis des Experten systems PUFF, eines Systems zur Diagnose obstruktiver Lungenkrankheiten.

Insgesamt gesehen weist GUIDON neue Wege für die Entwicklung didaktischer Programme in de Medizin auf; folgende Komponenten sind dabei von besonderer Bedeutung:

- Wissensbasis eines Expertensystems
- Bibliothek realer klinischer Fälle
- Trennung der Lehrstrategien von der fachspezifischen Wissensbasis
- Implementation didaktischer Expertise in Regelform

Overlay-Modell": Expertenwissen als Maßstab für die
eurteilung studentischer Kompetenz
'lexibilität: Anwendung des Systems auch mit anderen
'issensbasen
öglichkeiten zur Initiative von Studenten durch
lenu mit Kurztermini.

)tz dieser unbestreitbaren Vorzüge eines Systems wie GUIDON weist diese Konzeption erhebliche
igel und Gefahren auf. Sie bestehen vor allem darin, daß die eingeschränkte Form maschineller
)ertise als Standard gesetzt wird für die Beurteilung studentischer Lösungen. Auf die damit
ihergehende Gefahr der Begrenzung von Kreativität und Originalität wurde bereits eingegangen.
enso problematisch ist die Form begrenzter Dialoge zwischen System und Benutzer; die soge-
nten "short-terms" ermöglichen lediglich eine rudimentäre Form der Interaktion zwischen
nsch und Maschine, wobei seitens des Systems Verständnis simuliert wird, das jedoch real nicht
:handen ist. Problemübergreifende Fragen des Benutzers, die sich beispielsweise auf Hinter-
ndwissen oder einen anderen Blickwinkel des Problems richten, bleiben unberücksichtigt, da
n System keine Reaktionsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Die Annahme, die maschinellen
oblemlösungen seien, da sie erwiesenermaßen auf Expertenniveau stattfänden, dem Fachwissen
ner Lehrperson vergleichbar, ist nur unter dem engen Blickwinkel der jeweils spezifischen
lle richtig. Die Fülle an didaktischen und inhaltlichen Kompetenzen, über die Lehrende
rfügen, werden hier in ihrer Bedeutung für den Vermittlungsprozeß verkannt.

die damit einhergehenden Probleme im folgenden Teil der Arbeit noch ausführlicher behandelt
rden, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

5.1 Mängel und Grenzen von Wissensbasen und Problemlösungsmethoden in Expertensystemen

5.1.1 Allgemeine Bemerkungen

Auch die euphorischsten KI-Forscher sehen sich mittlerweile dazu gezwungen, Defizite bisla entwickelter Systeme aufzuzeigen, selbst wenn sie diese meist nicht als grundsätzliche Mäng ansehen. Dabei ist zu vermerken, daß die Kritik zum größten Teil(2) sporadisch und isolie erfolgt, ohne daß eine umfassende Analyse getätigt würde. Ebenso wird keine Differenzieru vorgenommen zwischen überwindbar erscheinenden Defiziten und grundsätzlichen Grenzen maschine ler Leistungsfähigkeit. Dies liegt wohl zum Teil darin begründet, daß die meisten KI-Forsch die Überzeugung vertreten, alle beobachteten Unzulänglichkeiten seien irgendwann zu überwinde Menschliche und maschinelle Leistungen werden kaum ernsthaft gegeneinander abgewogen, es s denn durch eine Gegenüberstellung der Resultate von Problemlösungsprozessen. Die weith verbreitete Annahme einer Isomorphie von maschinellen und menschlichen Problemlösungsprozess und die postulierte Vergleichbarkeit der Repräsentation von Wissen bei Mensch und Comput werden einer kritischen Überprüfung innerhalb der KI-Forschung nur selten unterzogen. S beziehen sich die ohnehin raren kritischen Kommentare - und dies trifft im Besonderen auf di Kritik von Expertensystemen zu - vorwiegend auf Einzelaspekte, die sich bei informellen Evalua tionen der Systeme als defizitär herausstellten. Eine grundlegende, die unterschiedlichen Ebene berührende Studie steht also noch aus. Im Folgenden soll der Versuch gemacht werden, zunächs die der KI-Forschung immanente Kritik an KI-Konzepten, vor allem an Expertensystemen, darzuste len, zu sammeln und zu ordnen, um auf dieser Grundlage abzuwägen, welche Kritikpunkte in nahe Zukunft wohl abgebaut werden könnten und welche eher grundlegender Natur sind, d.h. den Versuc zu unternehmen, prinzipielle Unzulänglichkeiten von Computersystemen gegenüber der menschliche intellektuellen Kompetenz aufzuzeigen.

5.1.2 Kritik an der Repräsentation von Wissen in Expertensystemen

Entsprechend dem Stellenwert, den Wissensbasen in KI-Systemen, vor allem in Expertensysteme einnehmen, beziehen sich eine Reihe der kritischen Anmerkungen innerhalb der KI-Forschung au die Mängel der Wissensrepräsentationsstrukturen und Wissensbasen.

Eine globale Kritik richtet sich zunächst auf das "closed-world"-Modell, d.h. die zu eng Begrenzung der Wissensgebiete von KI-Systemen; Retti(3) spricht in diesem Zusammenhang bei spielsweise von einer "beschränkten Wissensbasis und ihrer begrenzten Anwendbarkeit". Auc Brachman und Amarel(4) kritisieren diesen Aspekt: sie weisen auf den "narrow domain of exper tise" hin, der für die Wissensbasen heutiger Expertensysteme typisch ist. Die Eingrenzung de implementierten Wissens auf einen Partikularbereich bedinge zwar eine relative hohe Zuverlässig keit der Systeme in diesem Gebiet, mache aber eine Anwendung bei Fällen unmöglich, die auch nu geringfügig außerhalb dieser Domäne sich befänden. "They are unable to recognize or deal wit problems for which their own knowledge is inapplicable or insufficient" (5).

Die Unfähigkeit, Probleme außerhalb des eng begrenzten Wissensbereichs zu lösen, ist ein Kritikpunkt, auf den auch Gaschnig, Klar und Pople (6) hinweisen: " the program "knows" only what falls within its limited domain of expertise". Diese Einschränkung der Wissensbasen, die vor allem für Expertensysteme zutrifft, bedingt, daß diese Systeme bestimmte Fakten, die während eines Beratungsprozesses vom Benutzer in das System eingegeben werden, gar nicht verarbeiten können, weil ihnen aufgrund ihres eingeschränkten Wissens keine Möglichkeit einer entsprechenden Dateninterpretation zur Verfügung steht; " it is capable of "hearing" only pertinent facts" (7). Dabei tritt erschwerend hinzu, daß die Programme kaum Wissen besitzen, daß ihnen ermöglicht, die Grenzen des eigenen Problemraums abzuschätzen; sie verfügen lediglich über "little knowledge of their own scope and limitations" (8). Damit kann ein Expertensystem keine entsprechende Informa- tion an den Benutzer geben, wenn dieser Angaben macht, die über das implementierte Wissen eines Systems hinausgehen.

Die Fähigkeit, die Grenzen des eigenen Wissens zu erkennen und abschätzen zu können, ob ein Problem mit diesem Wissen lösbar sein kann, ist mit Sicherheit einer der wesentlichen Aspekte von Intelligenz; genau dieses Wissen, "knowing what we know"(9), ist bislang jedoch in KI- Systemen nicht oder nur rudimentär implementiert worden; sie besitzen in nur geringem Ausmaß sogenanntes Metawissen, das ihnen einen eigenständigen Umgang mit den gespeicherten Informa-

onen ermöglichen würde. Lediglich in simplifizierter Form, durch übergeordnete Kontrollregeln, e der Strukturierung und dem problemadäquaten Einsatz der Faktenbasis dienen, wurde versucht, tawissen in die Wissensbasis zu integrieren(10); "currently the use of self- knowledge is mewhat simplistic, providing basic explanation and justification capabilities"(11). Die twendigkeit der Integration umfassenden Metawissens wird allgemein gesehen, doch wird oftmals r Begriff reduziert auf Kontrollwissen, mit dem ein System leistungsgerechter, problemad- uater und benutzerfreundlicher arbeiten kann. (Auf die Problematik der Funktionalisierung des griffs "Wissen über Wissen" wird später noch einzugehen sein). Metawissen umfaßt hier demnach diglich die Steuerung des Problemlösungsprozesses, die Gewähr für einen fallspezifischen gang mit Wissen, die Fähigkeit, eigene Regeln konfigurieren zu können (12) sowie die Dialog- hrung zu steuern (14). Doch wird der Begriff innerhalb der KI-Forschung nicht ausgeweitet auf .e grundsätzlichen Fragen, die ihm immanent sind, d.h. Überlegungen, ob ein Computer überhaupt n Bewußtsein davon haben kann, daß er etwas weiß, bzw. was Metawissen im philosophischen und cht ausschließlich pragmatischem Sinne bedeutet.

n weiterer Kritikpunkt an Wissensbasen wird von Erman (15) hervorgehoben; er bezeichnet die präsentation der Relationen zwischen Objekten in der Datenbasis als zu starr, er kritisiert .e " simple, static relationships between objects"(16). In einer ähnlichen Weise argumentieren nvis und King(17); sie bemängeln die fehlenden Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Regeln, ie zu einer ineffizienten Unflexibilität des Systems führten. "Perhaps the most fundamental and ignificant characteristic of PS's" (Produktionssysteme) " is their restriction on the interac- ions between rules" (18). Dies bedeutet, daß die Informationsübertragung zwischen einzelnen egeln stets über die Datenbasis ablaufen muß und erst durch hier vorgenommene Modifikationen ie Interaktion zwischen Regeln realisierbar ist. Damit ist eine für Menschen typische Form der roblemlösung, der abrupte Wechsel des Blickwinkels bzw. Sprünge zu völlig neuen Hypothesen icht möglich, was zu der oft bemängelten Schwerfälligkeit existierender Systeme führt.

roblematisch ist auch die Akquisition neuen Wissens (19). Nicht nur ist es bislang kaum öglich, daß der Benutzer eigenständige Modifikationen der Wissensbasis vornimmt bzw. selbst eue Fakten implementieren kann; es stellt sich auch die Überprüfung der Wissensbasis nach der eueingabe hinsichtlich möglicher Widersprüche oder falscher Lösungen als schwierig dar. Die onzeption entsprechender Systeme (z.B. THEIRESIAS (20)) erbrachte bislang keine allgemein ufriedenstellenden Resultate.

ie Überprüfung, inwieweit angewandte Strukturen zur Repräsentation des Fachwissens dem jeweili- en Problembereich entsprechen, findet, wie oben bereits erwähnt, kaum statt. Raulefs(21) weist jedoch darauf hin, daß die adäquate Anwendung nicht immer gewährleistet ist, wobei offen bleibt, welche Kriterien angewandt werden, um eine derartige Beurteilung vornehmen zu können. Die artikulare Wahrnehmung dieser weitgefaßten Problematik soll jedoch nicht unerwähnt bleiben.

Ähnlich vage sind die Forderungen nach Verfahren, mit denen Konsistenz und Vollständigkeit von Wissensbasen analysiert werden könnten. Zwar erscheinen die Begriffe immer wieder in den Beschreibungen der Wissensbasen, doch werden sie vorwiegend unter funktionalen Gesichtspunkten betrachtet, d.h. es wird untersucht, ob offene Widersprüche in der Faktenbasis vorliegen bzw. ob die Faktenbasis ausreicht, um die anvisierten Probleme des entsprechenden Gebietes zu lösen. So wird beispielsweise eine Definition folgender Art für den Begriff der Unvollständigkeit einer Wissensbasis in Expertensystemen vorgenommen: "Incompleteness of the knowledge base is the result of: Missing rules: a situation exists in which a particular inference is required, but there is no rule that succeeds in that situation and produces the desired conclusion" (22).

Ähnlich vage bleibt die Beschreibung der Inkonsistenz von Expertensysten. Danach wird eine Wissensbasis dann als inkonsistent betrachtet:

1. wenn Regeln in der gleichen Situtation angewandt
   werden, die widersprüchliche Resultate beinhalten;
2. wenn Regeln redundant sind, d.h. gleiche Resultate
   in der gleichen Situation produzieren(23);

Die Berücksichtigung der philosophischen Tradition dieser Begriffe tritt gegenüber einem vorwiegend funktional ausgerichteten Umgang mit erkenntnistheoretischen Problemen zurück. Obwohl diese Position innerhalb der KI-Forschung als akzeptabel gilt, vertreten andere Wissenschaftler eine vorsichtigere Haltung und weisen darauf hin, daß die Problematik der Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit von Wissensbasen kaum je richtig aufgegriffen wurde. "Issues of concurrency

in reasoning and related questions of whether and how to maintain logical and semantic consistency of the knowledge bases also present crucial open questions" (24).

Eine generelle Kritik an der bislang vorherrschenden Form der Implementation von Wissen in Expertensystemen üben Brachman und Amarel(25); sie verweisen auf das Fehlen von Basiswissen, d.h. Grundlagenwissen, das die Basis für Problemlösungen im jeweils relevanten Fachgebiet darstelle. Ansätze zur Verankerung von generellem Wissen, etwa die Repräsentanz pathophysiologischer Zustände im System CASNET lösten dieses grundsätzliche Problem nicht, da bislang keine Wissenbasis ausreichend umfangreich konzipiert wurde, um die Fülle an Grundlageninformationen verankern zu können. Ohne dieses Basiswissen besteht jedoch immer die Gefahr falscher Schlüsse, da den Systemen kein Rückgriff auf elementare Prozesse und Zusammenhänge möglich ist. Gerade im Bereich der Medizin wird die elementare Wichtigkeit des Grundlagenwissens offenbar, da das Erkennen von Zusammenhängen und die Einsicht in eine zugrundeliegende Konstellation ohne Kenntnisse über physiologische und pathophysiologische Zusammenhänge nicht existieren kann. Die Forderung, generelles Wissen umfassender in Expertensystemen zu implementieren, scheitert vor allem an dem Umfang dieses Wissens, an der notwendigen, bislang nicht realisierten Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Fakten des Spezialgebiets und den allgemeinen Grundlagen sowie an der Entwicklung von adäquaten Repräsentationsstrukturen für dieses Basiswissen.

Brachman und Amarel(26) heben weiter hervor, daß Expertensysteme nicht über sogenanntes "Alltagswissen" verfügen; die alltäglichen Erfahrungen aber sind in vielen Bereichen mitentscheidend für eine korrekte und schnelle Problemlösung. Die Implementation dieses Alltagswissens stellt jedoch die KI-Forscher vor erheblich größere, bislang ungelöste Probleme als etwa die Verankerung von Expertenwissen, daß sich eher strukturieren läßt. Die Synthese von Expertise und dem common sense aber scheint die Grundlage für manche der unorthodoxen Lösungen zu sein, die Menschen in all jenen Fällen gegenüber der Maschine überlegen macht, in denen das Problem vom Normalmaß abweicht. Die hier angesprochene Problematik wird zwar innerhalb der KI-Forschung immer häufiger angesprochen, doch wird dieses Defizit als grundsätzlich überwindbarer Mangel betrachtet. Obwohl kaum einer sich um eine explizite Darstellung dessen bemüht, was sich hinter dem Begriff des Alltagswissens verbirgt, äußern doch viele KI-Forscher die Ansicht, dieses Wissen ließe sich in Computerprogramme in weiterer Zukunft übertragen.

Die hier genannten Punkte, die in der KI-Forschung als Defizite von Wissensbasen in Expertensystemen benannt werden, werden vorwiegend unter pragmatischen Gesichtspunkten betrachtet. Die Probleme werden aufgegriffen, weil die defizitären Wissensbasen eine Einbuße an Effektivität der Systeme bedingen, die sich überwinden ließe, hätte man die entsprechenden Defizite behoben. Die Implementation von Wissen stellt damit vor allem für die Konstrukteure von Expertensystemen nur insofern ein Problem dar, als es gelingen muß, ein benutzerfreundliches, leistungsfähiges und korrekt arbeitendes System zu bauen. Epistemologische Fragen, die sich unmittelbar aus dem Anspruch ergeben, man könne in Computern menschliches Wissen verankern, bleiben gegenüber den verwertungsorientierten Fragen weitgehend unberücksichtigt.

5.1.3 Defizite der Problemlösungsmethoden in Expertensystemen

Die im Bereich des "knowledge engineering" typische Trennung der "inference engine", d.h. der Problemlösungsmechanismen gegenüber der Wissensbasis, berechtigt zu einer gesonderten Darstellung der Defizite, die sich bei der Analyse der Problemlösungmethoden in der KI-Forschung ergeben.

Bereits diese Trennung jedoch wird von Retti(27) kritisiert, der die "Trennbarkeit des Wissens in Wissensbasis und Inference Engine" als problematisch und umstritten bezeichnet. Gemessen an der menschlichen Form der Problembewältigung, soweit man über diese Kenntnisse besitzt, erscheint eine derartige Trennung als künstlich. Die von Retti(28) angemerkte Kritik an dieser Trennung scheint gerechtfertigt und wird wohl auch von anderen KI-Forschern gesehen, die sich um eine unmittelbare Koppelung der Fakten, Problemlösungs- und Kontrollstrukturen bemühen. Bei der expliziten Darstellung verschiedener Defizite der Problemlösungsmodule wird deutlich, daß die aufgezeigten Mängel der "Inference Engine" mit den Unzulänglichkeiten der Wissensbasis im Zusammenhang stehen und die vorgenommene Trennung der beiden Komponenten eher formal als real ist.

An diesem Punkt wird auch die problematische Begriffsbildung in der KI-Forschung offenbar: die Fakten der Wissensbasis werden hier als das Wissen des Systems bezeichnet, wobei jedoch nicht der Umgang mit den Fakten, d.h. die Problemlösungsheuristiken und Kontrollregeln, unter diesem

ff subsumiert werden. Die ohnehin schon schwierige Entscheidung, ob die Kompentenz eines ters mit menschlichem Wissen gleichzusetzen ist, wird durch diese Unklarheit noch zuge- t. Allemal ließe sich für das Gesamtgefüge, d.h. Faktenbasis, Inference Engine und Kon- strukturen die Zuordnung des Begriffs 'Wissen' rechtfertigen.

ts bei der Darstellung von Defiziten der KI-Wissensbasen wurde der Mangel an übergeordnetem en in gegenwärtig existierenden Expertensystemen kritisiert. Das Fehlen von Metawissen ist für die Problemlösungsstrategien von Nachteil. So verfügen heutige Expertensysteme kaum Möglichkeiten, die Güte ihrer Problemlösungen abschätzen zu können. Ein Expertensystem ist pielsweise nicht dazu in der Lage, die eigenen Schlußfolgerungen zu bewerten; es fehlen nängige Mittel zur Beurteilung, inwieweit vollzogene Inferenzen problemadäquat und rational . "They have no independent means of checking whether their conclusions are reasonable" . Eine interne Bewertung der Qualität von Lösungen, das Wissen um die Kapazität der "Infe- e engine", sowie Kenntnisse über die Reichweise der internen Problemlösungsprozeduren, tzen Expertensysteme bislang nicht.

weiterer Kritikpunkt, den (30) aufzeigt, richtet sich auf die mangelnde Flexibilität der rence Engine; Hypothesenänderungen werden nur sehr schwerfällig vorgenommen, selbst wenn deren Fehlerhaftigkeit schon andeutete. So stellt sich die Frage, "how to keep the systems abandoning one hypothesis and turning to another one as soon as new information suggests her possibility" (31). Die für menschliche Experten selbstverständliche Fähigkeit, einen n Lösungsweg zu entwerfen und eine entsprechende Hypothese zu formulieren, sobald sich die re als falsch zu erweisen beginnt, ist mit den gegenwärtigen Problemlösungsstrategien in rtensystemen noch nicht möglich; Brachman und Amarel(32) weisen auf die eklatanten Schwie- eiten hin, Systeme zur Rekonzeptualisierung ihres Problemlösungswegs zu befähigen.

weiteres Defizit nennt Erman(33) die fehlende Möglichkeit, eine Optimierung der Problemlö- vorzunehmen. Die in der Entscheidungstheorie relevanten Methoden sollten in Expertensysteme egriert werden, um deren Effektivität zu steigern und unnötige Redundanzen bei der Lösungs- dung zu vermeiden.

luatoren von Expertensystemen(34) bemängeln die Unmöglichkeit, die Gültigkeit einer Antwort beweisen, wie dies mit Verfahren der formalen Logik realisierbar ist. Da es sich bei den sensgebieten, für die Expertensysteme konzipiert werden, um Bereiche mit heuristischen sagen handelt, ist diese Anwendung inadäquat. Die Alternative, Lösungen eines Systems an em allgemeinen objektiven Standard zu messen, ist ebenso schwierig. Insofern besteht keine kte und valide Methode zur Einschätzung der Richtigkeit und Qualität einer Lösung; weit iger noch existieren Methoden und Maßstäbe für die Bewertung des systeminternen Problemlö- gsprozesses, wobei letzteres kaum als Defizit angesehen wird. Erschwerend ist die Tatsache, in den verschiedenen Disziplinen lediglich begrenzte Vorstellungen über die angewandten blemlösungmethoden existieren; als Konsequenz sind lediglich "limited assumptions about blem and solution methods" (35) bei der Konzeption von Expertensystemen gemacht worden.

weiterer Kritikpunkt bezieht sich auf die bislang nicht realisierte Zuordnung spezifischer blemlösungsmethoden zu bestimmten Fachgebieten. Die Domänen, für die Expertensysteme konzi- ert wurden, unterscheiden sich beachtlich hinsichtlich ihrer Problemheuristiken. Aufgrund der grenzten Zahl an Anwendungsbereichen von Expertensystemen ist es jedoch nicht möglich, eine tsprechende Kategorisierung von Problemlösungs- prinzipien vornehmen zu können. So wird genwärtig ohne wesentliche Einschränkungen die Übertragung spezifischer Methoden, die sich in nem Fach als probat erwiesen haben, auf ein anderes Anwendungsgebiet praktiziert. Funktioniert s System, gilt dieses Vorgehen als gültig, ohne daß genauer auf die fachspezifischen Charakte- stika eingegangen würde. So ist bislang unentscheidbar, für welche Anwendungsbereiche eine hrscheinlichkeitsorientierte Suche wie in MYCIN adäquat ist oder wo eine eher festgelegte ruktur der Lösungsfindung zu bevorzugen ist. "Because of the limited number of domains in ich expert systems have been built, we have no good way of characterizing precisely those mains in which the deterministic approach of R1 will work and those in which the probabili- ic, search-based approach of MYCIN is necessary" (36).

ne weitere Schwierigkeit der Problemlösungsmethoden in Expertensystemen bezieht sich auf die cherheitsfaktoren, mit denen man vages, unsicheres Wissen zu fassen versucht. Problematisch st bereits die Umsetzung normalsprachlicher Überzeugungsaussagen in numerische Werte. Die von rman(37) vorgeschlagene Zuordnung bestimmter umgangssprachlicher Formulierungen zu spezifischen icherheitswerten löst die Schwierigkeit nicht; so macht er - als Auswahl - folgende Vorschläge:

Maybe (0.3) Probably (0.5) Almost certainly not (-0.7)(38).
Als zusätzliches Problem erweist sich die Koppelung mehrerer Wahrscheinlichkeitswerte für ein Parameter. So findet eine derartige Summation von Sicherheitswerten im Problemlösungsprozeß v MYCIN statt, wenn ein Parameter mehrfach evaluiert und dementsprechend auch verschiede Sicherheitswerte zugewiesen bekommt. Die Transformation subjektiver Einschätzungen stellt si auch hier als eine kaum lösbare Aufgabe dar(39). Die Festlegung des Maßes an Zustimmung gege über einer bestimmten Hypothese oder der Verknüpfung verschiedener Parameter ist insbesonde dann schwierig, wenn es sich um polyvalente Wahrscheinlichkeiten von Aussagen handelt. "Quanti fying confirmation and then manipulating the numbers as though they were probabilities quick leads to apparent inconstistencies or paradoxes" (40). Auch die Anwendung des Bayes-Theorem das sich in der Statistik als probate Methode erwiesen hat, birgt Probleme in sich, da d Unabhängigkeit der berechneten Parameter oft nicht gegeben ist(41).

Kritisiert wird darüberhinaus der geringe Einfluß, den die Sicherheitsfaktoren auf den Reas ningprozeß haben; Szolovits und Pauker(42) weisen darauf hin, daß die endgültige Entscheidu eines Systems von den Wahrscheinlichkeitszuordnungen im Lösungsprozeß kaum beeinflußt wird. D Wichtung der Hypothesen unter Berücksichtigung ihrer Sicherheitsfaktoren wird ebenso kritisier "the use of certainty factors as a means of ranking hypotheses is also suspect, since exampl can be given of cases where, of two hypotheses, the one with the lower probability would ha the higher certainty factor"(43). Deutlich wird hier wohl, wie sehr selbst die Konstrukteure v Expertensystemen der Modellbildung unsicheren Wissens durch "Certainty factors" mißtraue Besonders Buchanan und Shortliffe(44) fordern eine sorgfältige Überprüfung bislang angewandt Prinzipien und deren Bezugsetzung zu philosophischen, psychologischen und mathematische Traditionen im Umgang mit Überzeugungen und Wahrscheinlichkeiten.

Die gegenwärtige Unzulänglichkeit von Expertensystemen, auf frühere Erfahrungen bei Problemlö sungen zurückgreifen zu können und zu lernen, stellt ein weiteres wesentliches Defizit de Problemlösungskomponente dar. Zwar wird die Notwendigkeit, derartige Fähigkeiten in Computerpro gramme zu implementieren, von immer mehr Wissenschaftlern erkannt(45), (46), doch ist de Forschungszweig 'Lernende Programme' innerhalb der Künstlichen Intelligenz noch in den Anfänge begriffen, so daß eine Übertragung hier gewonnener Erkenntnisse in den Bereich des "knowledg engineering" noch aussteht(47). Gerade der Vergleich der Computerexpertise mit den Fähigkeite der Experten eines Fachgebiets zeigt aber, daß Menschen stets auf spezifische Erfahrungen be Problemlösungen zurückgreifen, was insbesondere dann von großer Wichtigkeit ist, wenn ei spezielles Problem vom Durchschnitt abweicht und schneller gelöst werden kann, wenn ein Bezug z analogen Erfahrungen möglich ist.

Obwohl sich an die Frage des analogen Denkens eine wichtige Diskussion anschließen müßte, wir hierzu lediglich bei Brachman und Amarel (48) eine kurze Anmerkung gemacht. Da die Entwickle von Expertensystemen diese Problematik nicht weiter berühren, soll im Rahmen dieser Darstellun der immanenten Kritik nicht weiter darauf eingegangen werden.

5.2 Grenzen der Dialogfähigkeit

Über diese Fragen der Speicherung von und des Umgangs mit Wissen hinaus zeigen sich weiter Schwierigkeiten: die mannigfaltigen Probleme, die sich bei der Konzeption natürlichsprachliche Computerprogramme ergeben, machen die Integration einer komfortablen und leistungsfähige Benutzerschnittstelle in ein Expertensystem äußerst schwierig. So ist generell eine seh reduzierte Sprachfähigkeit von Expertensystemen zu verzeichnen (49), die sich vornehmlich darau beschränkt, Daten vom Benutzer zu einem speziellen Fall zu erfragen und in stilisierter For Erklärungen zu vollzogenen Problemlösungen abzugeben. Die Kommunikationsfähigkeit ist be schränkt(50); Fragen des Benutzers sind lediglich in Form vorgegebener Muster oder sogenannte semantischer Primitivkonfigurationen möglich (siehe System GUIDON), was sich insbesondere i Bereich der didaktischen Anwendung als problematisch erweist. Die vorgegebenen Muster de Dialogführung erlauben allemal eine rudimentäre Interaktion zwischen Benutzer und System, wobei abgesehen von Fragen des Benutzers zum systeminternen Procedere, das Expertensystem in der Regel die Dialogführung bestimmt. Das Defizit an Sprachvermögen wird innerhalb des Sektors "knowledge engineering" von verschiedenen Autoren wahrgenommen; so weist Erman(51) auf diese Begrenzung i heutigen Expertensystemen hin, wobei hier vor allem die vorausgewählten Antworten, die geringe Zahl an Fragemöglichkeiten und die fehlende Möglichkeit zur Fokussierung eines Dialogs als Unzulänglichkeiten genannt werden.
Dabei ist die Uniformität der Frage- und Antwortmuster und die damit einhergehende Beschränkung der Eigeninitiative des Benutzers in denjenigen Expertensystemen besonders problematisch, die

· Beratung oder Ausbildung eingesetzt werden, also im Grunde eine aktive Partizipation des nutzers voraussetzten. Die Standardisierung der Dialogführung, Brachman und Amarel (52) echen in diesem Zusammenhang von einer "Stylized input/output languages", verhindert zudem e eigenständige Beeinflussung des systeminternen Lösungsprozesses; im Gegenteil arbeiten se Systeme relativ benutzerunabhängig und degradieren den Benutzer eher zum Assistenten (o.a. formationslieferanten).

e Erklärungen des Systems(53) (54) entsprechen in vielen Fällen (z.B. MYCIN) den systeminter- n Strukturen der Wissensrepräsentation. Darüberhinaus beinhalten die Erklärungen zum Lösungs- ozeß des Programms kaum je Bezüge zu grundlegenden Fragen des jeweiligen Fachgebiets (55). Die clegungen orientieren sich eng am internen Schlußfolgerungsmechanismus und gehen kaum über esen hinaus. Vorwiegend werden kausale Zusammenhänge, etwa in Regelform, dargelegt und als ndlage der Entscheidungsfindung präsentiert; diese reichen jedoch nicht hin, um die Grundla- n der Hypothesenformulierung für den Benutzer durchschaubar zu machen; "Causal information is eful but not sufficient for problem solving in most medical domains"(56). Fragen des Benut- rs, die über diese begrenzten Erklärungen des Systems hinausgehen, bleiben unbeantwortet, da e vom System weder verstanden noch beantwortet werden können.

oblematisch ist dabei auch die direkte Orientierung an den internen Repräsentationsstrukturen, nicht immer gewährleistet ist, daß diese Form der Explikation systeminterner Entscheidungen r den Benutzer verständlich ist. Hier erweist sich als nachteilig, daß ein Expertensystem, im gensatz zum Menschen, seine Erklärungen nicht an seinem Benutzer/Gegenüber orientieren kann, es einerseits über ein zu geringes Maß an Flexibiltät der Erklärungsweise verfügt und dererseits den Benutzer auch kaum einschätzen kann. Besonders ungünstig ist, daß bislang nur satzweise eine Speicherung falscher Lösungswege realisiert wurde(57). Durch die Dokumentation hlerhafter Schlüsse nämlich und die Begründung neuer Hypothesenbildungen unter Berücksichti- ung aktueller Patientendaten könnte der gesamte Entscheidungsprozeß transparenter und damit für en Benutzer nachvollziehbarer werden.

sgesamt gesehen kann man das Dialogmodul als sehr eingeschränkt und wenig benutzerfreundlich ezeichnen, wobei als besondere Nachteile die mangelnde Möglichkeit zur Eigeninitiative des enutzers und das nichtvorhandene Sprachverständnis zu nennen sind; So ist, zumindest vom egenwärtigen Stand der Forschung aus betrachtet, der Auffassung Brachman und Amarels(58) uzustimmen, die heutige Expertensysteme folgendermaßen charakterisieren: "They are more akin to diots savants than to real human experts".

.3 Prinzipielle Probleme von Expertensystemen

u den oben genannten Defiziten von Expertensystemen kommen weitere, eher grundlegende Schwie- igkeiten und Mängel hinzu, d.h. epistemologische, soziale und wissenschaftstheoretische ragestellungen. Im Rahmen der KI-Forschung werden diese Probleme kaum wahrgenommen, geschweige enn ausführlicher erläutert, doch weisen einige wenige Autoren auf bestimmte Aspekte hin, die m Rahmen der immanenten Kritik nicht unerwähnt bleiben sollen. Positiv anzumerken ist bei- spielsweise die Einsicht mancher Wissenschaftler, daß Expertensysteme nicht in allen Wissen- schaftszweigen zur Anwendung kommen sollten, sondern ihr Einsatz auf jene Gebiete beschränkt werden müsse, die eine Formalisierung zuließen. "Expert systems should not be forcing problems into models that are really inappropriate for their solution"(59). Sowa weist auf die Unmöglich- keit hin, menschliche Intuition in Computerprogrammen abzubilden; konsequenterweise müsse man Fachgebiete mit derartigen Entscheidungsfindungen als potentielle Einsatzbereiche von Experten- systemen ausklammern. "If the problem requires intuitive judgements about novel situations -...- then the intuition cannot be formalized in an expert system. The best application for an expert system are ones that require a large amount of well-defined, formalizable knowledge" (60). Die Relevanz analogen Denkens heben Brachman und Amarel hervor(61). Sie äußern die Überzeugung, daß analoges Denken in manchen Fachgebieten unabdingbar notwendig zur Entschei- dungsfindung sei, jedoch in Computersystemen nicht integriert werden könne, dies also bei der Determination möglicher Einsatzbereiche berücksichtigt werden sollte.

Als problematisch wird fernerhin die Tatsache angesehen, daß Experten oftmals kaum dazu in der Lage sind, ihre persönliche Expertise in strukturierter Form darzulegen, so daß sie vom Compu- terspezialisten in das Programm transformiert werden kann. Die euphorische Sicht Feigenbaums (62), man könne durch präzise Fragen dieses Wissen extrahieren, wird durchaus nicht von allen Wissenschaftlern geteilt. So hebt Rich(63) deutlich hervor, daß die gegenwärtig praktizierte Repräsentation von Wissen noch nicht befriedigend ist, da die menschliche Form der Organisation

von Wissen ungleich effektiver sei. "People are good at organizing many kinds of knowledge. But we do not yet understand how they do it" (64).

Andere fundamentale Mängel, die Expertensysteme gegenüber menschlichen Fachleuten aufweisen, werden hin und wieder auch erkannt(65). Sie bestehen vor allem in der mangelnden Flexibilität gegenwärtiger Programme bei der Hypothesenbildung und Überprüfung. Während menschliche Experten beispielsweise sehr rasch erkennen, ob eine Diagnosehypothese dem Krankheitsgeschehen entspricht, versucht ein System eine Verifikation aller möglichen Hypothesen unabhängig davon, ob eine dieser Alternativen bereits ein hohes Maß an Sicherheit aufweist. Expertensysteme sind nicht dazu in der Lage, den Problemlösungsprozeß an dem Punkt zu unterbrechen, wo ein Experte erkennt, daß entweder keine bessere als die bislang gefundene Lösung ermittelt werden kann bzw. überhaupt kein Resultat auf der Grundlage der aktuellen Daten zu erzielen ist. Gegenwärtige Expertensysteme sind nicht vorausschauend, d.h. durchlaufen alle möglichen Schritte bis zum Ende, selbst wenn dies sinnlos ist. Feltovich(66) hebt hervor, daß es bislang kaum gelungen ist, in Expertensystemen den flexiblen Umgang mit Wissen, wie er bei menschlichen Experten beobachtbar ist, zu realisieren.

Ebenso vermißt man die Fähigkeit zur hierarchischen Organisation von Wissen, d.h. der Zuordnung von Fakten zu verschiedenen Generalisierungsebenen und eine entsprechende unmittelbare Einschätzung ihrer Wichtigkeit. Feltovich vertritt die Auffassung, daß der vorherrschende Problemlösungsmechanismus heutiger Expertensysteme, die "hypothetico-deduction" (67) nicht hinreiche zur adäquaten Abbildung des menschlichen Entscheidungsprozesses. Da das menschliche Vorgehen aber bislang kaum erforscht wurde, ist es nach Meinung der Autoren eine dringliche Aufgabe für die Zukunft, detailliertere Forschungen anzustellen, um die Erkenntnisse über die Problemlösungsprozesse bei Experten in die Konzeption von Expertensystemen integrieren zu können.

Neben den insgesamt nur vordergründig angesprochenen Problemen, die sich aus der Zielsetzung ergeben, menschliches Wissen maschinell zu simulieren, werden vereinzelt auch soziale und soziokulturelle Probleme erwähnt, die sich aus der zu erwartenden Verbreitung von Expertensystemen ergeben können. So weisen Vandamme Vervenne et al. (68) auf die zu erwartenden Verluste an Arbeitsplätzen hin, die sich vor allem dann ergeben würden, wenn die anvisierte Koppelung von Expertensystemen und Fertigungsrobotern tatsächlich realisiert würde. Antizipiert wird eine damit einhergehende völlige Wandlung der gegenwärtigen Gesellschaftsstruktur, die sich durch eine Kluft zwischen wenigen hochqualifizierten Arbeitenden und einer großen Anzahl Arbeitsloser kennzeichnene ließe.

Problematisch erscheint ferner(69) die Entwicklung und Anwendung von Expertensystemen in Bereichen, die eine derartige Formalisierung des Wissens nicht zulassen. Die hier artikulierte Kritik richtet sich aber weniger auf die potentielle Veränderung und den möglichen Verlust von Wissen, sondern eher auf die damit gekoppelte Ineffizienz derartiger Systeme, wie ohnehin die Modifikation von Wissen durch die Formalisierung in Expertensystemen kaum je bedacht wird.

Kritisiert wird weiter die geringe Anzahl an Experten, deren Wissen Grundlage für ein Expertensystem ist. Retti(70) weist darauf hin, daß oftmals lediglich ein Experte an der Entwicklung eines Expertensystems beteiligt ist. Brachman und Amarel(71) zeigen die damit einhergehende Gefahr auf; sie sprechen in diesem Zusammenhang von der Möglichkeit, daß ein einzelner Experte zum "knowledge czar" (72) wird, d.h. seine individuelle Expertise als dominanter Standard des jeweiligen Fachgebiets gelten könnte.

Epistemologische Probleme, die sich aus der Repräsentation von Wissen in Computern ergeben, werden lediglich global von Sloman(74), Hayes(75) und Carbonell (76) angesprochen, wobei nur Sloman(77) auf die speziellen Probleme eingeht, die sich aus der Konzeption von Expertensystemen ergeben. Er sieht gegenwärtig noch fundamentale Unterschiede zwischen der Wissensrepräsentation in Expertensystemen und der menschlichen Expertise; "In particular human abilities involve a degree of generality, flexibility and extendability are not matched by any present-day expert system" (78). Dabei nimmt er jedoch eine grundsätzliche Chance zur Implementation der menschlichen Kompetenz in Computerprogramme dann an, wenn die menschliche Expertise nur erst ausreichend genau erforscht sei. Resümierend kann festgestellt werden, daß sich die Ansätze zu einer kritischen Analyse von Expertensystemen vorrangig darauf beschränken, die Gründe für mangelnde Einsatzmöglichkeiten, Ineffizienz und fehlende Akzeptanz beim Benutzer herauszufinden, um auf dieser Grundlage leistungsfähigere Systeme zu bauen. Grundsätzliche Fragen, die sich auf die Zulässigkeit von Strukturen zur Repräsentation von Wissen beziehen, auf die Analyse des Problemlösungsprozesses oder gar auf soziokulturelle oder epistemologische Probleme, werden nur

ikular und oft sehr oberflächlich angesprochen. Der Vergleich zwischen Mensch und Maschine für die Konstrukteure von Expertensystemen nur insoweit relevant, als sie sich dadurch eine esserung der Systemkonfigurationen erhoffen.

gegenwärtige Stand der Forschung zeichnet sich demnach durch das Fehlen einer grundlegenden tik an Expertensystemen aus, in der eine Differenzierung vorgenommen wird hinsichtlich aubarer Defizite heutiger Systeme und prinzipieller Mängel von Computerprogrammen, wie sie n aus der Nichtformalisierbarkeit bestimmter menschlicher Kompetenzen ergeben. Der Versuch er solchen Kritik soll in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit unternommen werden, indem maschinellen Fähigkeiten die menschlichen gegenübergestellt werden, d.h. auf die Verankerung den Umgang mit Wissen sowie die Problemlösungsfähigkeiten des Menschen detailliert eingegan- wird.

6.1 Philosophische Grundlagen des Leib-Seele-Problems

Die Frage, ob Maschinen zu kognitiven Leistungen in der Lage sind, die den menschlichen äqui valent sind, läßt sich auf unterschiedlichen Ebenen bearbeiten. Eine erste Zugangsweise besteh darin, das materielle Substrat der menschlichen Kognition unter dem Blickwinkel zu überprüfen inwieweit neurophysiologische Prozesse grundsätzlich zu vergleichen sind mit den physikalische Vorgängen in Computern, oder ob qualitative Differenzen existieren zwischen der maschinellen un der menschlichen Form der Informationsverarbeitung. Im Folgenden soll der Versuch gemach werden, die physiologischen Besonderheiten des menschlichen Gehirns und seiner Funktionsweis aufzuzeigen und daran anschließend einige grundlegende Unterschiede gegenüber Computern darzu stellen.
Die Analyse der physiologischen Grundlagen kognitiver Prozesse berührt eine alte philosophisch Fragestellung: die theoretische Auseinandersetzung mit dem Leib-Seele-Problem. Der Disput darüber, ob die geistigen Vorgänge auf materielle Geschehnisse zurückzuführen sind oder ob da Geistige als unabhängige Entität gegenüber dem materiellen Substrat zu begreifen sei, umfaß auch die Frage, ob Maschinen potentielle Bewußtseinsträger sein können. Verschiedene Position wurden im Verlauf der menschlichen Geschichte entwickelt, von denen einige kurz dargestel werden sollen. Dabei wird in der Darstellung der physiologischen Grundlagen des menschliche Bewußtseins eine materialistische Auffassung vertreten, da nur auf der Basis einer solche Annahme überhaupt eine Argumentation vertreten werden kann, die den Vergleich des materielle Substrats von Mensch und Maschine als mögliche Begründung betrachtet für die Annahme, da heutige Computersysteme nicht über ein dem Menschen vergleichbares Bewußtsein verfügen können.
Ob das Geistige als unabhängige Entität aufzufassen sei, die vom Körper getrennt existiert, oder ob die mentalen Vorgänge auf körperliche zurückzuführen seien, stellt seit ihren Anfängen eine Streitfrage innerhalb der Philosophie dar, die sich in den beiden allgemeinen Positionen de Dualismus und des materialistischen oder idealistischen Monismus widerspiegelt. Der Kern de sogenannten Leib-Seele-Problems ist die Identifikation des Subjekts mentaler Prädikate. Ver schiedene Auffassung wurden im Laufe der Zeit entwickelt, um diese Fragestellung zu erhellen.

Wie oben bereits erwähnt, differenziert man grundsätzlich zwischen der dualistischen Auffassung d.h. der Annahme, daß das menschliche Bewußtsein, das Geistige, als unabhängig vom Körper z betrachten sei, und der monistischen Position, die entweder alles Geistige auf körperlich Vorgänge zurückführt (Materialisten) oder den Geist als die Grundsubstanz alles Realen begreift (idealistische Position). Beide Richtungen entwickelten verschiedene Konzepte, von denen einig im Folgenden kurz angesprochen werden.

Unter die monistische Position sind zunächst die Behavioristen und die Positivsten zu rechnen Vertreter dieser Schulen lehnen den Begriff des Geistigen ab und beschränken sich auf di Erforschung dessen, was sich im menschlichen Verhalten offenbart. Für sie stellt das Leib-Seele Problem ein Pseudoproblem dar.
Hume, Spencer und Du Bois-Raymond gehören zu einer Gruppe von Wissenschaftlern, welche die Frag nach dem Geistigen als unlösbares Problem ansehen, mit dem zu beschäftigen es sich nicht lohne Infolgedessen beschränkten sie ihre Forschung vorwiegend auf das physikalische Substrat, d.h auf die neurophysiologischen Prozesse.

Die idealistische Position wurde vor allem von Berkeley, Hegel, Mach und de Chardin vertreten während zu den reinen Materialisten Russel und Carnap zu zählen sind. Dabei ist die materiali stische Position aufzugliedern in eine reduktionistisch-materialistische Auffassung (Psychisch Prozesse entsprechen physikalischen Prozessen), und einen emergentistischen Standpunkt, der übe das physikalistische Konzept hinausgehend die biologische Determiniertheit geistiger Prozess betont. Zu letzteren zählen Diderot, Darwin, Hepp, Cajal und Bunge. Die emergentistisch Konzeption wird später noch ausführlicher erläutert werden, da sie gegenüber der physikali stischen die Auffassung vertritt, daß die Informationsverarbeitung bei Menschen und Computer nicht vergleichbar sei.

Die psychophysischen Dualisten gehen von einer unabhängigen Entität des Geistigen aus Wittgenstein als einer ihrer Vertreter nimmt demnach eine unabhängige Existenz von Psyche un Physis an, wobei insbesondere der Begriff des Geistigen unscharf bleibt. Die Gestaltpsychologi geht von einer parallelen Synchronizität von psychischen und physiologischen Abläufen aus un weist darauf hin, daß viele psychische Prozesse, etwa emotionale Erregungen, von körperliche Vorgängen begleitet werden.
Davon zu unterscheiden sind die dualistischen Theorien, die von der Wirkung der einen Substan auf die jeweils andere ausgehen. Der Animismus, der Interaktionismus und der Epiphänomenalismu

nlen zu den entsprechenden Positionen, zu deren hauptsächliche Vertreter Toulmin, Popper und cles sowie Freud zu rechnen sind.

den dualistischen Theorien spiegelt sich eine jahrhundertealte Auffassung wieder, die durch ligionen, Mythen und den Alltagsglauben stabil gehalten wurde. Diese äußert sich in der ndsätzlichen Annahme, daß eine zweite Entität neben der körperlichen existiere, die mit den iketten Geist, Seele etc. bezeichnet wird. Diese Position wurde begründet mit den Verweisen f beobachtbare Wechselwirkungen zwischen Geist und Körper, wie sie etwa bei Willkürbewegungen zutreffen sind. Der angenommenen kausalen Beziehung zwischen Geist und Körper stehen jedoch ele Erkenntnisse der modernen Neurophysiologie entgegen. Statt eine Wechselwirkung zwischen rper und Geist anzunehmen, muß, so beispielsweise Bunge (1) , von einer horizontalen Wechsel-rkung zwischen verschiedenen neuronalen Systemen ausgegangen werden. "Im einfachst möglichen ll läßt sich eine psychische oder mentale Eigenschaft oder ein entsprechendes Vermögen als nktion des kartesischen Produkts der Menge aller plastischen Nervensysteme und die Menge aller itpunkte darstellen." (2). Indizien für die materielle Substanz des menschlichen Bewußtsein nd beispielsweise physiologisch bedingte Störungen von psychischen Prozessen. Die Tatsache, ß verschiedene psychische Erkrankungen gekoppelt sind an bestimmte physiologische Abweichungen nn als Hinweis auf die Richtigkeit einer monistischen Theorie ebenso gewertet werden wie die entifikation bestimmter Hirnareale, die bei unterschiedlichen geistigen Prozessen erregt sind.

ute sprechen demnach viele Erkenntnisse der Hirnphysiologie für eine materialistische Auffas-ng, während die dualistischen Positionen oftmals diffus in ihrer Argumentation bleiben und mer wieder auf die Transzendentalebene ausweichen. So ist einer der gegenwärtig überzeugend-en Ansätze zur Erhellung des Leib-Seele-Problems der nichtreduktionistische Materialismus, ne Position, die eine unmittelbare Gleichsetzung von Mensch und Maschine ablehnt und auf den nschen als biologisches Wesen verweist. Diese Auffassung mit ihrer streng materialistischen rgumentation vermeidet Begründungen, die das menschliche Bewußtsein als körperunabhängige ntität begreifen; vielmehr stützt sich dieses Konzept auf hirnphysiologische Erkenntnisse, die ne grundsätzliche Differenz zwischen Mensch und Maschine nahelegen. Geistige Objekte wie orstellungen und Konzepte werden hier mit bestimmten neuronalen Netzen gleichgesetzt und sychische Zustände und Prozesse als Zustände und Prozesse des Gehirns begriffen. Psychophy-ische Beziehungen erscheinen als Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Teilsystemen des ehirns und anderen Organteilen, basieren also auf einer gegenseitigen Beeinflussung von erschiedenen Neuronalen Systemen.

ieses mit Bunge (3) als emergentistisch bezeichnete materialistische Konzept führt demnach sychische Prozesse auf biologisch-systemische Abläufe des Gehirns zurück. Damit unterscheidet ich diese Position nicht nur von idealistisch-monistischen und dualistischen sondern auch von treng physikalisch ausgerichteten Auffassungen, die alle kognitiven Prozesse sowie das Bewußt-ein an sich auf physikalische Mechanismen zurückführen. (4)
m Folgenden werden die neurophysiologischen Korrelate von verschiedenen kognitiven Prozessen argestellt, um auf dieser Basis den Versuch einer Argumentation gegen jene Annahmen zu unter-ehmen, die von der Möglichkeit maschinellen Bewußtseins heutiger Computersysteme ausgeht.

.2 Das organische Substrat des Bewußtseins

.2.1 Die Besonderheiten des ZNS

ange herrschte innerhalb der Neurophysiologie die Auffassung vor, nach der das menschliche ehirn in verschiedene, voneinander unabhängige Module zu unterteilen sei. Diese Vorstellung äßt sich nach heutigen Erkenntnissen nicht länger aufrechterhalten; vielmehr geht man in-wischen davon aus, daß dreidimensionale neuronale Geflechte die materielle Basis der verschie-enen Hirnfunktionen darstellen. Das sogenannte "Kristallmodell der neuronalen Verflechtungen" 5) impliziert eine erheblich größere Flexibilität der menschlichen Gehirnstruktur als dies für ie Modultheorie zutrifft.
euronenverbände stellen somit die Basis aller Hirnprozesse dar. Dabei ist nicht nur der jeweilige Neuronenkomplex von entscheidender Bedeutung für die jeweils ausgeführten Hirnfunk-ionen, sondern jedes singuläre Neuron übt in diesem Verband eine systemgebundene Funktion aus. "In jeder Schicht und in jedem Kristall eines gegebenen Rindenfelds unterscheidet sich jedes euron von seinem Nachbarn durch seine funktionelle Singularität" (6). Die ungeheuer große Zahl an Neuronen im menschlichen Gehirn, 15 Millionen Neuronen pro Kubikzentimeter, führt dazu, daß Hirnprozesse nie wirklich redundant sind; im Gegenteil lassen sich die neuronalen Systeme durch ständige interne oder extern bedingte Modifikationen kennzeichnen. Entscheidendes Charkteri-

stikum der menschlichen Hirntätigkeit ist, daß bereits bei einfachsten Verhaltensweisen komplexe neuronale Prozesse stattfinden. "Beim Menschen setzt die einfachste motorische Operation die Aktivität riesiger Nervenzellverbände auf verschiedenen Ebenen gleichzeitig voraus"(7). Dabei ist jedes Netzwerk charakterisiert durch seine spezifischen elektrischen Impulse, die inhibitorisch oder exzitatorisch sein können, durch die chemischen Signale mit unterschiedlichen Transmittersubstanzen, seine Lokalisation innerhalb des Gehirns sowie seiner speziellen inneren Verdrahtung, wobei alles zusätzlich noch dauernden Veränderungen unterliegt, die einserseits auf die "intrinsische Spontanaktivität der Nervenzelle"(8), andererseits auf den kontinuierlichen Informationsfluß zwischen den einzelnen Hirnarealen zurückzuführen sind. Die überdies ablaufende Vernetzung unterschiedlicher Systeme, die bereits bei einfachen Operationen stattfindet, macht deutlich, welche Mannigfaltigkeit die menschliche Hirntätigkeit auszeichnet.

Die materialistische Annahme, daß es neurale Prozesse sind, die sich "verhalten", entspricht der Auffassung, daß äußeres Verhalten und inneres Erleben neuralen Prozessen entsprechen, die im Gesamtorganismus oder in Teilsystemen des Organismus ablaufen. Es ist das ZNS "oder eines seiner Teilsysteme, das Verhaltensweisen bestimmt, fühlt, Vorstellungen bildet, Willensakte vollbringt, nachdenkt, plant usw." (9). Psychisches Verhalten ist demnach zu betrachten als ein Kollektiv oder eine Teilmenge von Hirnfunktionen, deren Lokalisation im Zentralen Nervensystem liegt; oder anders ausgedrückt, Verhalten geht einher mit einer Mobilisierung von Neuronen, das Verhalten wird demnach aus materialistischer Sicht determiniert durch ein dafür zuständiges neuronales System und die darin zirkulierenden Impulse (10).

Das Zentrale Nervensystem wird hier nicht als rein physikalisches System begriffen, wie dies etwa bei den Kybernetikern angenommen wurde (11), sondern erscheint in der emergentistischen Position als biologisches System. Diese Auffassung wird durch verschiedene Tatsachen untermauert.
So reagiert das ZNS nicht nur auf sensorische Inputs, sondern produziert darüberhinaus auch kontinuierlich autonome Aktivitäten. Die elektrischen Potentiale im Kortex können spontan entstehen, so daß eine dauernde neuronale Aktivität ohne direkte sensorische Reizung angenommen werden kann. Die sensorischen Reize bewirken damit lediglich eine Fixierung der Aufmerksamkeit, sind jedoch nicht als alleiniger Auslöser von psychischen oder körperlichen Prozessen zu anzusehen.
Das Neuron wird hier nicht länger mit einem bloßen Ein-/Aus-Schalter gleichgesetzt, da die biochemischen Vorgänge im synaptischen Spalt nach heutigen Erkenntnissen als mindestens ebenso relevant erscheinen (12) wie die rein physikalische Informationsübertragung(13). Die Synapsen fungieren als Schaltstellen, die durch eine beidseitige Durchlässigkeit von Impulsen für die Bildung von Neuronenkomplexen von entscheidender Bedeutung sind. Die synaptischen Informationsüberträgersubstanzen, die sogenannten Transmitter, weisen dabei eine große biochemische Vielfalt auf (14). Die Unterschiedlichkeit der Transmitterstoffe erweitert in ungeahntem Maße die Möglichkeiten der Informationsvermittlung und läßt verschiedenartigste Nuancierungen zu. "Diese Vielfalt, die einerseits chemisch bedingt und andererseits dem elektrischen Effekt der Neurotransmitter zu verdanken ist, schafft eine verschwenderische "Signalkombinatorik" - rechnerische Möglichkeiten, zu denen ein rein "elektrisch" arbeitendes Neuron nicht ohne weiteres in der Lage wäre" (15). Neben der elektrischen, oder auch als physikalisch bezeichneten Informationsübertragung kann man also von einer chemischen Kodierung ausgehen. Mit der chemischen Etikettierung werden genauere und differenziertere Beziehungen zwischen den Neuronen oder Neuronenkomplexen ermöglicht als mit der rein physikalischen. Diese entsprechen den feinen Schattierungen von Empfindungen und Reaktionen, durch welche sich das menschliche Verhalten auszeichnet. Zwar ist es nicht möglich, bestimmten Transmittern spezifische Empfindungen zuzuschreiben, doch arbeiten viele neuronale Systeme innerhalb ihrer Kettenglieder mit bevorzugten Transmittersubstanzen (16). Innerhalb eines neuronalen Netzwerks, dessen Aktivierung ein bestimmtes Verhalten hervorruft, werden also jeweils spezifische chemische Überträgersubstanzen wirksam.

Die neuronalen Verbindungen lassen sich unterteilen in statische und dynamische. Während die statischen neuronalen Verknüpfungen, beispielsweise der Sehfelder, unabänderliche Verbindungen darstellen, sind die dynamischen Verknüpfungen nicht präzise determiniert, sondern stellen Gebilde dar, die sich nur für bestimmte Gelegenheiten bilden. Auch sind die Grenzen der dynamischen Systeme unscharf, sie variieren bei jeder neugebildeten Konfiguration.

Ein weiterer Hinweis darauf, daß das ZNS nicht als ausschließlich physikalisches System zu begreifen ist, offenbart sich in der engen Wechselwirkung zwischen dem Zentralen Nervensystem und dem neuroendokrinen System. Die neuronalen und humoralen Systeme (Nebennierenrinde, Hypophyse und Hypothalamus) sind eng miteinander gekoppelt, einige Neuronen produzieren sogar chemische

:gers. Die Hormone beeinflussen die neuronalen Aktivitäten; dies ist aber nicht gleichzu-
n mit psychischen Prozessen.

auch die Annahme innerhalb materialistischer Positionen als unumstößlich gilt, daß psy-
ne Prozesse neuralen Vorgängen im Gehirn entsprechen, so ist doch noch unklar, welche
ystems für spezifische Empfindungen verantwortlich sind. Grundsätzlich ist eine atomi-
he Zuordnung von psychischen Vorgängen zu Einzelneuronen abzulehnen. So kann ein isoliertes
)n niemals als verantwortlich für eine spezifische psychische Konstellation begriffen
n. Stattdessen sind multineurale Systeme für psychische Prozesse entscheidend.(17)

Gehirn ist dementsprechend zu betrachten als ein "System von spezialisierten Teilsystemen
Organen" (18). Diese Auffassung wird durch Untersuchungsergebnisse bestätigt, mit denen die
g bestimmter Areale gelang, die für spezifische psychische Abläufe verantwortlich sind.
psychische Funktion erscheint hier als Funktion eines neuronalen Systems, das entweder ein
sches oder ein dynamisches Gebilde sein kann. Welche psychischen Prozesse auf festgefügten
nalen Konfigurationen basieren bzw. welche vorübergehenden Gebilden entsprechen, konnte
ng noch nicht hinreichend geklärt werden, doch existieren Indizien dafür, daß kreative und
)ferische Prozesse kaum auf statische Neuronenkomplexe zurückzuführen sind, vielmehr gerade
ynamischen Repräsentation bedürfen.
chtlich der Fragestellung, ob das menschliche Gehirn mit einer Maschine zu vergleichen sei,
vor allem die Fähigkeit des ZNS zur Plastizität entscheidend. Das Vermögen, neue neuronale
kturen bilden und damit Teile seiner Funktionen modifizieren zu können, stellt eine der
ntlichen Unterschiede dar zwischen Computer-Hardware und Gehirn. Die neuronale Umorganisa-
entspricht den kognitiven Fähigkeiten des Lernens und Umlernens. Die Neu- oder Umbildung
neuronalen Systemen geschieht durch die Bildung oder Verstärkung bestimmter synaptischer
indungen und die damit einhergehende Neukonfiguration von Neuronenverknüpfungen.

emergentistische Annahme eines plastischen Nervensystems, daß zur unabhängigen Neubildung
neuronalen Systemen in der Lage ist, steht im Gegensatz zur Informationstheorie, die das ZNS
lebloses, informationsverarbeitendes System behandelt. Die hier vertretene Auffassung
achtet das Nervensystem als lebendes System, das biologische Funktionen regelt und kontrol-
t und das nicht nur informationsverarbeitend, sondern auch informationserzeugend ist.

rakteristisch für das menschliche Nervensystem ist außerdem seine ungeheuer große Zahl an
ichen Zuständen. (19). Diese Mannigfaltigkeit basiert auf den vielfältigen dentritischen
weigungen eines Neurons (bis zu 1000 Dendrit-Fortsätze pro Neuron(20)) und der großen
fältigkeit an unterschiedlichen Neuronentypen (21), die eine unvorstellbar große Zahl an
ichkeiten der systemspezifischen Zusammensetzung ermöglichen. Damit sind extrem nuancierte
ferenzierungen zwischen psychischen Prozessen möglich. "Zur vollständigen Beschreibung der
tikalen "Maschine" würde also die Beschreibung von einigen Dutzend Milliarden jeweils
gulärer" Neuronen gehören, wobei jedes singuläre Element noch ein Repertoire von etlichen
send synaptischen Kontakten einschließt"(22).
alleinige Betrachtung der Summe isoliert gesehener Neuronenfeuerungen ist damit nicht
reichend für eine Erklärung der neuronalen Prozesse, der informationstheoretische Ansatz
cheint also verkürzt. Erst die Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Summatione. von
lionenfachen, oft leicht phasenverschobenen Wirkungen können als Indiz gelten für die
sikontinuierlichen Prozesse im menschlichen Gehirn.

vielen Besonderheiten des menschlichen Gehirn gegenüber einer Maschine, die sich global mit
Begriffen quasikontinuierlicher Informationsverarbeitung, autonome Informationserzeugung,
temischer Verbund von Neuronen, vielfache dentritische Verzweigungen, neurochemische Trans-
ter als Informationsüberträgersubstanzen und enge Koppelung mit dem hormonalen System
chreiben lassen, gipfeln in der bedeutsamsten Differenz, der Plastizität des ZNS. Diese
genart des menschlichen Gehirns unterscheidet den Menschen nicht nur von allen anderen
ewesen, sondern ebenso von Computern. Das ZNS des Menschen zeichnet sich damit durch seine
igkeit zur Selbstorganisation und Selbstmodifikation aus. Die "Fähigkeit zur Selbstorgani-
ion ist eines der auffälligsten Merkmale der Gehirnmaschine, deren höchstes Erzeugnis das
ken ist"(23). Während das Verhalten niederer Tiere vorprogrammiert ist, verfügt der Mensch
ch die Plastizität des ZNS über ein flexibles, lernfähiges Anpassungssystem. So ist es ihm
der Grundlage seiner plastischen Systeme möglich, neue Funktionen zu lernen, indem neue
nektionen zwischen den Neuronen gebildet werden. Die Fixierung dieser Konnektivität ent-
richt dem Prozeß des Behaltens, der über die Stabilisierung bestimmter synaptischer Verbin-
gen erfolgt.

Resümierend ist das ZNS damit beides; ein biologisches, d.h. lebendes und zur Selbstorganisati fähiges sowie ein informationsverarbeitendes System. In dieser spezifischen Synthese ist jedoch nicht einfach reduzierbar auf die Funktionsweise einer Maschine, wie im Folgenden no ausführlicher verdeutlicht werden soll.

6.2.2 Die Hirnfunktionen

Die Funktionen des Zentralen Nervensystems lassen sich in zwei Hauptfunktionen untergliedern:
- die Steuerungsfunktionen,
- die Wahrnehmungs- und Erkenntnisfunktionen (24).

Die Steuerung umfaßt die motorischen Abläufe, die inneren Systemprozesse (z.B. Verdauung) u die Sinneswahrnehmungen. Die Wahrnehmung bezieht sich auf äußere Vorgänge, interne Aktivität und die eigene Gehirntätigkeit. Insbesondere die Wahrnehmungsvorgänge entsprechen den kognitiv Prozessen im ZNS. Sie umfassen das Erkennen der Aussenwelt ebenso wie die Selbsterkenntnis, d sich auf das Gewahrwerden von Emotionen und das Wissen um eigene mentale Zustände bezieht. D Hirnaktivitäten zeichnen sich durch ein äußerst geringes Maß an Redundanz aus. So wiederho sich kein Aktivitätszustand des Gehirns in genau der gleichen Weise, da sich die meist neuronalen Systeme in einem kontinuierlich Wandlungs- und Erneuerungsprozeß befinden. Neura Systeme sind außerdem nur selten für eine genau definierte psychische Aktivität verantwortlich Zwar kann ein bestimmtes Teilsystem als zentral betrachtet werden für eine spezifische Aufgab doch haben viele andere Teilsysteme unterstutzende und verändernde Funktionen, wirken also a die spezifische Aktivität mit ein. Die Unmöglichkeit, einem bestimmten neuronalen System ei eindeutig definierbare psychische Aktivität zuordnen zu können, kann als weiterer Indikator f den grundsätzlichen Unterschied zwischen Mensch und Maschine gelten, da letztere eben jene kla Zuordnung voraussetzt.

Eine weitere wesentliche Eigenart der menschlichen Hirnfunktionen ist die Fähigkeit zur Eigenak tivität. Entgegen früheren Vorstellungen, nach denen das ZNS nur auf Außenreize reagiert ansonsten aber passiv sei, wird heute die Auffassung vertreten (26), daß die Zustandsänderunge im ZNS teils reizbedingt sind und teil spontan ablaufen. Die ständige autonome Aktivierung den unterschiedlichen Hirnschichten und der damit einhergehende Informationsaustausch gilt heut als erwiesen, so daß psychische Prozesse als Prozesse als Synthese zu begreifen sind v sensorischen Reizen und autonomen internen Aktivitäten des Nervensystems. Die gegenseitig Stimulation verschiedener neuronaler Teilsysteme als autonome Aktivität des ZNS markier wiederum einen Unterschied zwischen Mensch und Maschine, scheint doch diese Eigenaktivität a biologische Bedingungen geknüpft zu sein.
Geistige Aktivitäten finden, wenn sie nicht an starre Systeme gekoppelt sind, in plastische neuronalen Systemen statt. Mentale Vorgänge setzen damit die Fähigkeit zur Bildung neuer und z Modifikation existierender neuronaler Systeme voraus. "Mentale Zustände können sich nur be solchen Lebewesen bilden, die über ein plastisches, d.h. funktionell nicht festgelegtes (nich auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiertes) neurales System verfügen (nur in ihnen spielen sic mentale Prozesse ab)." (27). Jeder mentale Vorgang ist immer im Gesamtzusammenhang alle zeitgleich ablaufenden Prozesse zu betrachten, wobei die mentalen Zustände nicht an ein bestimm tes neuronales System gebunden sind. "Ein und derselbe mentale Prozeß kann bald in diesem, bal in jenem neuronalen System ablaufen" (28). Diese angenommene Variabilität der neuronale Systembildungen ist unmittelbar abhängig von der Plastizität des Nervensystems, d.h. setzt di Fähigkeit zur Bildung und Wandlung bestehender Strukturen voraus. Man kann daher von eine Lokalisation des Psychischen nur bedingt sprechen, da nur wenige psychische Abläufe an di präzise Lokalisation des neuronalen Systems gebunden sind bzw. die Lokalität zumeist nur z einem definierten Zeitpunkt gilt.
Die genauere Übrprüfung der Hirnfunktionen offenbart, daß die meisten mentalen Vorgänge insbesondere jene, die als kognitive Leistung des Menschen zutage treten, unmittelbar gebunde sind an die biologischen Besonderheiten des menschlichen Gehirns, die sich durch die Fähigkei zur Selbstorganisation, die Plastizität der Neuronensysteme, den internen Informationsaustausc und die autonome Aktivierung auszeichnen gegenüber der starren Hardwarestruktur von Computer systemen.

6.2.3 Wahrnehmung und Empfindung

Verschiedene Konzepte existieren darüber, wie Wahrnehmungen im menschlichen Gehirn verarbeite und verankert werden. Der Innatismus beispielsweise vertritt die Auffassung, daß die Sinnesein drücke zuvor existierende mentale Schemata evozieren, es also angeborene Strukturen gäbe, au

lche die konkreten sensorischen Reize wirken. Der Empirismus lehnt diese Auffassung ab und ht stattdessen davon aus, daß das menschliche Bewußtsein zu Beginn der ontogenetischen twicklung mit einer tabula rasa zu vergleichen sei, auf der die Wahrnehmungen als Engramme neu rankert werden.

nerhalb des menschlichen Gehirns sind die sensorischen Impulse in der Hirnrinde intern praesentiert. Die sensorisch erfaßten Objekte werden durch unerschiedliche kortikale Repräsentionen im Gehirn verankert; so existieren Darstellungen für Färbe, für Orientierung, für die mliche Gestalt von Objekten, die erst in ihrer Zusammenfügung die Merkmale eines Objekts llständig erfaßen. Wahrnehmungen sind nicht gleichzusetzen mit der reinen Perzeption sensoscher Reize; vielmehr setzt die Wahrnehmung eine Interpretation und Einordnung des sensoschen Inputs voraus, d.h. sie beinhaltet kognitive Prozesse. Mannigfaltige Detektoren im ZNS, r allem Chemo- und Neurorezeptoren, sind zu einer Filterung und Selektion der Signale in ge. Die Neurosensoren stehen in Verbindung mit neuronalen Systemen, die für bestimmte kognive Wahrnehmungsprozesse verantwortlich sind. Dabei sind die Neurosensoren nicht nur Empfänger n Außenreizen, sondern verarbeiten auch Signale, die im ZNS lokalisiert sind. Die neuronalen steme, die für die Wahrnehmungsvorgänge verantwortlich sind, sind nur im primärprozeßhaften adium statisch, während die neuronalen Systeme, die für die Interpretationsvorgänge entscheiend sind, als vorwiegend plastische Systeme anzusehen sind. Neisser (29) wies bereits darauf n, daß Wahrnehmung nicht Abbildung bedeutet, sondern Konstruktion, also plastische Systeme raussetzt. "Die Bausteine solcher Wahrnehmungsgebilde sind Empfindungen, Gedächtnis und wartungen. Außenreize sind eher Bezugsobjekte und Auslöser von Erwartungen und nicht so sehr ren Ursache" (30). Die beobachtbaren Verzerrungen der internen Repräsentationen von äußeren jekten deuten auf die Plastizität der verantwortlichen neuronalen Systeme und offenbaren die ktive und kreative Natur des Wahrnehmungsprozesses. Entscheidend ist dabei, daß die äußeren ize lediglich als Modulatoren der Eigenaktivität des ZNS fungieren, d.h. nicht als Verursacher n Wahrnehmungsprozessen begriffen werden dürfen. Die autonomen Aktivitäten des Zentralen rvensystems beeinflussen damit ursächlich die Verarbeitung von sensorischen Inputs. An dieser telle wird ein erkenntnistheoretisches Problem deutlich, nämlich die Divergenz zwischen "dem ing an sich" und "dem Ding für uns". Die neurophysiologischen Grundlagen der Wahrnehmungsvoringe offenbaren die Ursachen dieser Divergenz. Indem nämlich der sensorische Reiz nicht alleine ir die interne Repräsentation einer Wahrnehmung verantwortlich ist, sondern die autonomen ktivitäten des ZNS die Interpretation des sensorischen Inputs maßgeblich prägen, differiert das entale Engramm gegenüber dem realen Objekt. Das gleiche Objekt wird somit nicht nur subjektspefisch, d.h. individuell unterschiedlich wahrgenommen, sondern erscheint auch phänomenologisch fferent durch verschiedenartige Etikettierungs- und Kategorisierungsvorgänge.

ie Wahrnehmungsprozesse tangieren zunächst lediglich die phänomenologische, Ebene, d.h. die rscheinungsebene eines Objekts. Sie implizieren kognitive Akte, die als Konglomerat von ypothesenbildungen, -überprüfungen und einem passiven Registrieren der Dinge zu begreifen sind. as Wesen eines Objektes wird durch den bloßen Perzeptionsakt noch nicht erkannt; das wesensmäige Erfassen oder Verstehen eines Objektes erfolgt erst durch sekundäre kognitive Akte, die das ein phänomenologisch Erfaßte in Beziehung setzen zum Gesamtzusammenhang der äußeren und inneren ealität. Dabei konfiguriert sich die innere Realität aus einer Vielzahl an Engrammen, die der ensch im Zuge seiner Entwicklung erwirbt und die oftmals als Muster oder sinnvolle Konfigurationen miteinander vernetzt sind und als ursächlich begriffen werden können für gestalthafte ahrnehmungsprozesse.

ahrnehmungsprozesse lassen sich also resümierend nicht reduzieren auf die blosse Encodierung n sensorischen Reizen, sondern sie beinhalten kognitive, d.h. interpretierende Vorgänge, die uf plastischen neuronalen Systemen basieren. Die Wahrnehmung ist damit nicht auf Musterkenungsprozesse zu beschränken, sondern impliziert weitaus komplexere kongitive Akte, die plastische und autonome Fähigkeiten des ZNS zur Voraussetzung haben. Wahrnehmungsprozesse in dem Sinne, wie sie für den Menschen typisch sind, erscheinen gebunden an die Besonderheiten des Zentralen Nervensystems und weisen damit auf grundsätzliche Barrieren hinsichtlich ihrer otentiellen Übertragbarkeit auf eine Maschine.

5.2.4 Rechte und linke Hirnhemisphäre

Untersuchungen über die Unterschiede zwischen der rechten und linken Hirnhemisphäre wurden auch nnerhalb der Neurophysiologie betrieben. Dabei wird die linke Hirnhemisphäre als vorwiegende okalisation von Konzepten angesehen, d.h. verbalen Repräsentationen, die für die Sprache von elang sind. Der rechten Hemisphäre werden musikalische und bildliche Vorstellungen zugeordnet

sowie räumliche Repräsentationen. Beide Hirnhälften stehen jedoch in ständiger Interaktio miteinander, d. h. sind nicht isoliert zu denken und schaffen erst durch den kontinuierliche Informationsaustausch Bedeutungen. "Die rechte Hemisphäre analysiert und bringt in erster Linie Vorstellungsbilder hervor, während die linke sich auf verbale und "abstrakte" Operatione spezialisiert" (31). Beide Hirnhälften können zwar bei Durchtrennung des corpus callosu getrennt operieren, doch ist die eigentliche Mannigfaltigkeit menschlicher Intelligenz erst au das Zusammenspiel beider Hemisphären zurückzuführen. Weizenbaum(32) folgerte aus dieser Unter schiedlichkeit beider Hemisphären, daß lediglich die linke Hemisphäre mit Computern simulier werden könne, dagegen jedoch die rechte Hirnhälfte, die er als maschinell nicht abbildba begriff, für all jene Aspekte menschlichen Geistes verantwortlich sei, die da künstlerisch-kreative Denken umfassen. Obwohl diese strikte Trennung der Lokalisation vo bestimmten intellektuellen Fähigkeiten nicht unbedingt aufrechterhalten werden kann, wird doc deutlich, daß erst im Zusammenspiel beider Hemisphären jene Fähigkeit des menschlichen Geiste erwächst, die in Gegenüberstellung zu Computern als ontologische Besonderheit des Mensche begriffen wird.

6.3 Die geistigen Objekte

Die mentalen Objekte, derer sich das Denken bedient, stellen auch für die neurophysiologisch Forschung eine Herausforderung dar. So versucht man zu identifizieren, auf welche interne Repräsentationen im Denkprozeß zurückgegriffen wird, und wie sich diese mentalen Konstrukte au der neuronalen Ebene unterscheiden lassen.

Als wesentliche Elemente des Denkprozesses werden die sensorischen Eindrücke, deren mental Repräsentationen und die Abstraktionen, d.h. Vorstellungen und Konzepte angenommen. Bereit Aristoteles führte das menschliche Denken auf Vorstellungen und sprachliche Repräsentatione zurück, und auch Hume (33) sah das Denken geprägt durch Sinneseindrücke ("impressions") un Ideen ("ideas"). Entgegen den Annahmen der Rationalisten und einigen psychologischen Richtunge wie der Würzburger Schule, die von einem vorstellungsfreien Denken ausgingen, gelten nac heutigen Erkenntnissen Vorstellungen als wesentlicher Teil der geistigen Operationen de Menschen.

Das menschliche Denken operiert demnach mit sensorischen Reizen, auch als Perzepte bezeichnet mit Vorstellungen und Konzepten. Perzept, Vorstellung und Konzept haben eine ähnliche materiell Basis, sie sind also nicht nur auf der semantischen Ebene, sondern auch auf der neuralen Eben miteinander verwandt. Changeux beispielsweise vertritt die Auffassung, "daß Perzept, Gedächtnis bild und Konzept verschiedene Formen oder Zielzustände der mentalen Einheiten geistiger Repräsentationen sind", die er unter der allgemeinen Bezeichnung "geistige Objekte" zusammenfaß (34). Perzept, Vorstellung und Konzept basieren trotz ihrer engen Relation auf teilweis unterschiedlichen neuronalen Strukturen, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Das biologische Substrat des sensorischen Eindrucks, im Folgenden mit Changeux (35) als Perzep bezeichnet, ist lokalisiert in den sekundären Assoziationsfeldern des Gehirns. Der sensorisch Eindruck läßt sich als Synthese unterschiedlicher Merkmale eines Objektes begreifen, wobei die Perzeption in einer hierarchischen und einer parallelen Reizzuordnung erfolgt. Der primäre Eindrück ensteht also durch die hierarchische Verknüpfung der verschiedenen, merkmalsspezifischen sekundären Assoziationsfelder. Durch die sukzessive Aufeinanderfolge der neuronalen Strukturen der einzelnen Felder entsteht der Globaleindruck. Dabei erfolgt gleichzeitig die Aktivierung der primären und sekundären Abbildungen. Das Perzept basiert damit auf einer topologischen (Aktivierung verschiedener neuronaler Systeme) und einer dynamischen (elektrische und chemische Aktivierung) Form der Informationsverarbeitung. Ein Perzept ist als dynamisches, geistiges Objekt zu begreifen, d.h. es ist eine vorübergehende Repräsentation. Es läßt sich gleichsetzen "mit einem körperlichen Phänomen, das durch die wechselseitige und vorübergehende (sowohl elektrische wie chemische) Aktivierung einer großen Population, eines "Verbunds" von Neuronen zustande kommt, die über mehrere genau lokalisierte Rindenfelder verteilt sind."(36). Da es eine vorläufige interne Repräsentation darstellt, ist es abhängig von externen Reizen und basiert auf der konkreten, sinnlichen Empfindung. Die Verknüpfungen des aktuell gebildeten neuronalen Systems, das dem jeweiligen Perzept entspricht, stellen damit ebenfalls variable Verbindungen dar. Erst durch die Verankerung eines Perzepts im Gedächtnis, d.h. der interner Repräsentation eines selbständigen, umweltunabhängigen Gedächtnisobjekts, das als Vorstellung zu begreifen ist, werden die neuronalen Verbindungen permanent. Beim Übergang vom primären Perzept zur Vorstellung muß die Neuronenkoppelung konsolidiert werden; der Prozeß des Sich-Merkens kann demnach als interne Stabilisation von neuronalen Systemen gekennzeichnet werden. Vorstellunger

nen also charakterisiert werden als reizunabhängige, mentale Bilder privaten Charakters, die s Ursprungsperzepten resultierten. Diese geistigen Bilder entstehen spontan, d.h. ohne die nittelbare Einwirkung äußerer Reize, indem bestimmte Engramme mit spezifischen Erinnerungen toppelt werden. Die Vorstellung von Objekten läßt mentale Einwirkungen auf diese zu, etwa die istige Rotation von Objekten oder die intern vollzogene Modifikation von Situationskompo-nten. Damit lassen sich Vorstellungen als wesentlicher Bestandteil des antizipatorischen und ekulativen Denkens begreifen. Die Materialität des Vorstellungsbildes kann als gegeben rachtet werden (37). Untersuchungen ergaben, daß die Vorstellungen den Objekten relativ genau sprachen; ebenso wurden mentale Vergrößerungen oder Verkleinerungen der Objekte proportional izise vollzogen.

s Vorstellungsbild weist immer noch neurale Überschneidungen mit seinem Ursprungsperzept auf, h. ein Teil derjenigen Neuronen, die bei der Primärwahrnehmung aktiviert wurden, sind in das uronale System integriert, das für die jeweilige Vorstellung verantwortlich ist. Damit inhaltet die Vorstellung immer auch neuronale Teilsysteme, die den primären Sinneseindrücken tsprachen, d.h. sie enthält eine sensorische Komponente, die in unmittelbarer Abhängigkeit eht zum sensomotorischen Apparat des Menschen. Die beim Perzept vorfindbare Isomorphie ischen dem Perzept und dem äußeren Objekt wird in der Vorstellung teilweise aufgehoben; das istige Bild enthält damit nur noch einen Teilaspekt jener unmittelbaren Lebendigkeit, die dem rzept anhaftet. Dennoch bleiben Aspekte jener ursprünglichen Isomorphie auch bei der Vorstel-ng erhalten, neuronal erklärbar durch die Kongruenz von Neuronenkomplexen bei Perzept und rstellung.

mgegenüber stellt das Konzept als dritte Repräsentationsform eine Abstraktion des realen jektes dar, bei der sich keine direkte Isomophie mehr aufzeigen läßt. Das Konzept beinhaltet f neuronaler Ebene keine direkte sensorische Komponente mehr, d. h. es ist in anderen Ebenen s Gehirn lokalisiert als die Perzepte und die Vorstellungen. Konzepte sind damit von äußeren nsorischen Reizen ebenso unabhängig wie die Vorstellungen, d.h. eine Verkettung von Konzepten, .e sie etwa bei der Bildung eines Satzes vollzogen wird, kann unabhängig von externen Prozessen rfolgen. Der Abstraktionsgrad ermöglicht eine deutliche Ausweitung der Kombinations- und rkettungsmöglichkeiten mit anderen geistigen Objekten. Die Überprüfung der Verkettungen rfolgt durch den Vergleich der Konzepte mit den Vorstellungen als bildhaften Erinnerungen und en konkreten Perzepten. "Die Fähigkeit zur Schaffung neuer Konzepte - gemeinhin als Vorstel-ngskraft bezeichnet - beruht auf Verkettung und Kombination der Konzepte und Vorstellungen" 38). Das Konzept stellt also eine abstrahierte Schematisierung von realen Objekten dar. Der ugriff auf diese Konzepte erfolgte jedoch real oftmals auf der Basis eines Prototyps (39), der n Gedächtnis als formalisierte Vorstellung real wahrgenommener Objekte gespeichert wird. ahrnehmungs- und Erkenntnisprozesse greifen somit auf Konzepte und Vorstellungen gleichermaßen u, ja verknüpfen die beiden Repräsentationen in bedeutungszuweisenden Akten.

odor (40) vertrat die Ansicht, daß die geistigen Objete bereits als Prärepräsentationen vor der nteraktion mit der Außenwelt im Gehirn des Menschen existierten. Diese vielfältigen Strukturen leien jedoch hinsichtlich ihrer neuronalen Verknüpfungen sehr labil. Die Stabilisation der euronalen Systeme erfolge erst durch den umweltbedingten Selektionsprozeß. "Die Identität einer nneren Repräsentation wird dabei durch das "Mosaik" (das Netzwerk) der Singularitäten und durch len Aktivitätszustand (Zahl und Häufigkeit der darin zirkulierenden Impulse) festgelegt" (41).

usammenfassend basieren also Perzept, Vorstellung und Konzept auf neuronalen Systemen, wobei lie Stabilisierung neuronaler Verknüpfungen der Verankerung der jeweiligen Repräsentation als Engramm im Gedächtnis entspricht. Perzepte basieren auf vorläufigen, instabilen neuronalen Systemen, während die Vorstellungen und Konzepte als stabile Neuronenkomplexe zu begreifen sind. Die Vorstellungen weisen in Teilbereichen eine neuronale Isomorphie mit ihren Ursprungsperzepten auf, d.h. ihnen haftet immer noch ein Aspekt des "Lebendigen" an, sie sind also gebunden an das sensorische System. Reflektiert man diese Erkenntnisse unter dem Blickwinkel der maschinellen Hardwarestruktur, so fällt insbesondere das Defizit an Perzepten und damit auch an Vorstellungen auf, das schon aufgrund der unmittelbaren Abhängigkeit zum sensorischen System des Menschen nicht aufhebbar erscheint. Da die geistigen Bilder auf der neuralen Ebene Überschneidungen mit den Neuronen ihrer Ursprungsperzepte aufweisen, ist die maschinelle Implementation geistiger Bilder problematisch, sind diese doch scheinbar unmittelbar gebunden an die Existenz sensorischer Hirnfelder. Sie setzen damit ein biologisches System voraus, das über das neurophysiologische Substrat dessen verfügt, was wir unter Erleben, Erfühlen und sinnlicher Wahrnehmung verstehen. Dieses Substrat scheint zumindest an die Existenz entsprechender Neuronen gebunden zu sein, d.h. den Senso- und Motorneuronen, die als neuronale Basis der entsprechenden Empfin-

dungen fungieren. Selbst wenn Konzepte als Abstraktionen realer Wahrnehmungen zu begreifen sind, ist doch die Basis ihrer Entstehung immer an die menschliche Form der Perzeption von Wirklichkeit gebunden. Es scheint so zumindest fraglich, ob die Annahme zulässig ist, daß die Verankerung von Gedächtnisobjekten in Computerprogrammen der Organisation des menschlichen Gedächtnisses und seinen spezifischen Repräsentationen vergleichbar ist. Zumindest für Perzepte und Vorstellungen ist dies vom gegenwärtigen Stand der Technik aus gesehen abzulehnen, doch auch die maschinelle Implementation von Konzepten, wie sie ja im Rahmen der KI- Forschung durch schematisierte Repräsentationsstrukturen (semantische Netze, Frames und Scripts) versucht wird (42), erscheint fraglich, bedenkt man das sensomotorische Erleben, das jedem Konzept zugrundeliegt. Wenn man also der Auffassung zustimmt, daß Computersysteme potentiell wissende Systeme sind, so ist deutlich hervorzuheben, daß die Art der maschinellen Repräsentationen von denen des Menschen deutlich unterschieden sind.

6.4 Das menschliche Gedächtnis

Gedächtnisprozesse werden, ebenso wie die sensorischen und effektorischen Aktivitäten, als Erregungsprozesse im Zentralnervensystem angesehen (43). Man unterscheidet inzwischen grundsätzlich zwischen den neurophysiologischen Grundlagen des Kurzzeitzeitgedachtnisses und den Mechanismen, die für das Langzeitgedächtnis charakteristisch sind.

So gelten heute neuronale Kreiserregungen als die "biologische Grundlage des Kurzzeitgedächtnisses"(44). Die Speicherung von Impulsfolgen, so nahm als erster Lorente de N (45) an, erfolge in kreisförmigen Anordnungen, so daß die Erregungen in geschlossenen Kreisen für eine gewisse Zeit bestehen blieben. Die Existenz sogenannter "reverberatory circuits"(46) fand durch bestimmte morphologische Eigenarten des Neurons eine Bestätigung: man identifizierte kollaterale rückläufige Verbindunge.. von Axonen sowie kreisförmige Verkettungen von Neuronen(47). Die kurzfristige Speicherung von Informationen durch kreisförmige Erregungsmuster deutet auf die Störanfälligkeit und die Vorläufigkeit des Kurzzeitgedächtnisses hin. Die zeitlich begrenzte Speicherfähigkeit der "reverberation circuits" deutet darauf hin, daß kreisförmige Erregungsmuster keine hinreichende Erklärung bieten für die neurophysiologischen Grundlagen des Langzeitgedächtnisses. Dies wird insbesondere offenbar, bedenkt man, daß Informationen des Langzeitgedächtnisses lückenlos erhalten bleiben trotz Narkoseeingriffen, Elektroschocks oder längeren Bewußtseinsstörungen (48), die ja den Inhalt des Kurzzeitgedächtnisses zerstören.

Für die Konsolidierung von Erregungsmustern im Langzeitgedächtnis sind nach heutigen Erkenntnissen Stoffwechselprozesse von entscheidender Bedeutung. So stellte man die Beteiligung der RNS an Lernprozessen fest, da der Konzentrationsgrad der RNS in einem Neuron mit steigendem Aktivitätsgrad einer Nervenzelle ständig zunimmt. Hyden (49) ermittelte, daß während der Aktivierung von Neuronen deren RNS eine leichte Verschiebung des Verhältnisses ihrer Nucleinsäuren aufwies, die zur Bildung von neuen Proteinmolekülen führen (50). Diese Proteine zeichnen sich durch eine erhöhte Bereitschaft aus, Informationen weiterzuleiten. "Jede Zelle kann auf eine große Zahl von Impulsmustern reagieren und zahlreiche spezifische modifizierte RNS-Stränge "speichern", so daß erregungsspezifische Proteine vorhanden bleiben, die für verschiedenste Muster eine erleichterte Weitergabe durch die betreffende Zelle zur Folge haben" (51). In der Folge von Lern- und Konsolidierungsprozessen sind erhöhte Konzentrationen spezifischer Eiweisskörper (52) im Gehirn zu finden, die Annahmen über die Beteiligung von Nukleinsäuren an Lernprozessen bestätigen. Ebenso sprechen Untersuchungsergebnisse über den biochemischen Transfer des Erlernten (53) für die Theorie, daß neugebildete Peptide die Erregbarkeit bestimmter Schaltzellen des intervenierenden Systems beeinflussen.

Hebb(54), Schade(55) und Scheibel(56) gehören zu den Neurophysiologen, die in der materiellen Veränderung der Neuronen die Grundlage für die Gedächtnisspeicherung sehen. Es kann inzwischen als erwiesen gelten, daß bei der Speicherung von Informationen morphologische Veränderungen stattfinden. Diese Veränderungen umfassen Neubildungen von dendritischen Verzweigungen, die oben unter dem Begriff der Plastizität des Zentralnervensystems gefaßt wurden, sowie die Zunahme bestimmter Gliazellen und neue Synapsendifferenzierungen. Die Vermehrung von dendritischen Verzweigungen und Synapsenendigungen steht in enger Abhängigkeit von der Art der eintreffenden Reize; "ausgeschaltete" Hirnregionen zeigen in weitaus geringerem Umfang diese materiellen Modifikationen. Dieser theoretischen Annahme entsprechend ist das Gedächtnis als gestaltgewordenes Erregungsgeschehen anzusehen.

Eine dritte Annahme, die von Cajal(57), Hebb(58) und Eccles(59) vertreten wird, besteht darin, daß im Zuge von Lernprozessen synaptische Veränderungen auftauchen. Die Grundidee ist die

rstellung, daß die Verbindung von Neuronen, die gespeichert werden soll, verstärkt wird, um im Wiederauftreten derselben Erregung deren Wahrscheinlichkeit oder Intensität zu erhöhen. es kann auf verschiedene Weise erfolgen:
- durch eine Transmittermobilisation,
- neugebildete Enzyme, die eine Veränderung der Rezeptoren an der postsynaptischen Empfängerzone hervorrufen,
- Änderung der Anzahl der Synapsen,
- Vergrößerung oder Verkleinerung der Synapse (Synapsenhypertrophie oder -degeneration).

ntscheidend für die Organisation des menschlichen Gedächtnisses ist die Struktur der Großhirnnde, insbesondere die übereinander- liegenden Zellkristalle, die für die Interaktion der uronen von Bedeutung sind. Diese Organisationsstruktur scheint dafür verantwortlich zu sein, ß Gedächtnisobjekte nicht statisch lokalisiert sind, sondern durch die weitverzweigten rnetzungen Verbindungen zu weitentfernten Gedächtnisobjekte aufzeigen. "Das "Neuronennetzwerk" s geistigen Objekts zeichnet sich dadurch aus, daß seine Organisation zugleich ortsgebunden d ortsungebunden ist" (60). Entgegen früheren Annahmen, die von statischen Gedächtnismodellen sgingen, tendiert man heute zu einer dynamischen Konzeption. Die statischen Modelle erwiesen ch - obwohl die KI-Konzepte zumeist darauf zurückzuführen sind - als unbrauchbar für Erklärngen über die Funktionsweise des menschlichen Gedächtnisses, da dieses auf dynamisch-konstruktven Prozessen basiert; "menschliche Erinnerung involviert Rekonstruktion und zeigt dabei owohl schöpferische wie auch destruktive Elemente" (61). Die Erinnerung impliziert damit eine odifikation der erinnerten Inhalte, die durch den Rekonstruktionsprozeß bedingt sind (62). mputer dagegen lassen die Informationen unverändert, sie vollziehen eine bloße Reproduktion er gespeicherten Fakten.
ie menschliche Gedächtnisaktivität äußert sich nach den Erkenntnissen der Neurophysiologie in er
- Verstärkung oder Schwächung bestehender Verbindungen von neuronalen Systemen und
- der Verstärkung oder Schwächung synaptischer Konnektivität.

ie Stärke oder Schwäche der synaptischen Verbindungen hängt vom Gebrauch ab; ähnlich wie in der gnitionspsychologie wird eine stärkere Verbindung in all jenen Systemen angenommen, die äufigere Anwendung finden bzw. stärkere kontextuale Assoziationen aufzeigen. Die Gedächtnisbahung wird durch die entsprechenden Vorgänge an den Synapsen verankert. Durch die Fixierung ynaptischer Verbindungen werden variable neuronale Verbindungen zu permanenten Netzwerken. abei sind die chemischen Prozesse an der Synapse entscheidend für die verschiedenen kurz- oder angfristigen Neuronenverbände bzw. deren Stabilisierungen.

edächtnisleistungen stellen also eine aktive Rekonstruktion bestimmter Engramme dar. Engramme ind nach Eccles (63) Raum-Zeit-Muster einer neuronalen Aktivierung; eine bestimmte Erinnerung leicht also einem spezifischen Muster neuronaler, vernetzter Impulsfolgen. Dabei entspricht die inzigartigkeit des Musters der Einzigartigkeit der erlebten Erfahrung. "Wenn also ein Raumeit-Muster neuronaler Aktivierung eine ungefähre Kopie eines bei einer früheren Gelegenheit ufgespielten ist, so wird das Subjekt eine Erfahrung davon herleiten, die es als eine Erinerung an die Erfahrung, die natürlich vom Original der Kopie herrührt, erkennt." (64). Erinnerungen sind demnach eine Reaktivierungen von Engrammen, d.h. ein Neubeleben ehemaliger Verbindungsmuster.

abei ist die Annahme wohl zulässig, daß die Erinnerung an Handlungen mit einer Reaktivierung örperlicher Schemata identisch ist, während die Erinnerung an Wahrnehmungen und an Vorgänge in er Außenwelt eine Rekonstruktion sensorischer Perzepte darstellen könnte. Mit der These einer ktiven Organisation des menschlichen Gedächtnisses wird jedoch vorausgesetzt, daß plastische euronale Systeme an den Reaktivierungsprozessen beteiligt sind, zumal die Erinnerungen nur in en seltensten Fällen genau dem realen Vorgang entsprechen. Das Konzept eines dynamischen edächtnisses steht damit im Gegensatz zu den bisherigen Implementationsversuchen in Computerrogrammen, die ja über jene Fähigkeit der Selbstorganisation nicht verfügen.

in maschinelles Gedächtnis - der Begriff des Datenspeichers scheint hier treffender - verfügt uf der materiellen Ebene nicht über die Möglichkeit, Veränderungen seines Substrats vorzuehmen. Inwieweit softwaremäßige Modifikationen den materiellen Veränderungen im Gehirn isomorph sind, bleibt offen. Betrachtet man also diejenigen Prozesse, die für die menschliche Gedächtnisspeicherung kennzeichnend sind, so sind folgende substantiellen Veränderungen zu nennen:
- der Aufbau von Neuromodulatoren (Peptide), die Zellverbindungen in erhöhte oder verminderte Erregbarkeit versetzen;

- die lokalen Synapsenveränderungen, die Transmittermobilisationen, Rezeptormodifikationen, Beeinflussungen des Second Messengers sowie synaptische Wachstumsprozesse (65) umfassen;
- die Zelldifferenzierung und Zellvermehrung, d.h. die Entwicklung neuer dendritischer Fortsätz und das Anwachsen der Zahl an Gliazellen.

"Im Gegensatz zu dem allgemein verbreiteten Glauben an eine statische Struktur müssen wir un das Gehirn auf der Mikroebene strukturell plastisch vorstellen, wobei einige Synapsen reif andere in der Entwicklung und wieder andere im Abbau begriffen sind" (66). Genau diese Plastizi tät auf der Mikroebene markiert den wesentlichen Unterschied zwischen Computer- Hardware und de menschlichen Gehirn. Flexibilität und Modifikation sind nur softwaremäßig zu realisieren, da e sich bei Computern nicht um biologische Systeme handelt.

Diese wesentlichen Veränderungen, die im Zuge des Lernprozesses und der Gedächtnisspeicherung i menschlichen Gehirn ablaufen, sind - zumindest auf der materiellen Ebene - nicht vergleichba mit den statischen Verbindungen der Computerhardware, die sich zum Beispiel dadurch charakteri sieren lassen, daß zwischen den einzelnen Speicheradressen keine Kommunikation möglich ist, di nämlich nur über den zentralen Datenbus stattfindet. Ebenso sind keine materiellen Veränderunge in dem Sinne möglich, daß neue Konnektionen zwischen Einzelelementen gebildet werden können, ei Phänomen, daß auch softwaremäßig nur schwer zu realisieren wäre. Die Vergleiche Kents(67), de etwa das Langzeitgedächtnis mit Massenspeichern von Computern auf eine Ebene stellt bzw. i Arbeitsspeicher eines Computers ein Äquivalent zum Kurzzeitgedächtnis sieht, wirken auf de Basis die_er neurophysiologischen Erkenntnisse unhaltbar. Zusätzlich ist anzumerken, daß di gespeicherten Muster, hier die Bitmuster, keine raum-zeitlichen Erregungsstrukturen darstellen sondern lediglich zeitliche Impulscodierungen. Ob also Gedächtnismodelle, die auf Computer erstellt wurden, zur Theoriebildung über das menschliche Gedächtnis herangezogen werden könne oder ob nicht vielmehr die divergenten materiellen Grundlagen für eine Nichtvergleichbarkei sprechen, muß dahingestellt bleiben. Es scheint zunächst notwendig, auf die unterschiedlich materielle Basis von menschlicher und maschineller Gedächtnisstruktur hinzuweisen und z bedenken zu geben, welche möglichen Gefahren in einer allzu leichtfertigen Gleichsetzung de Gedächtnisses von Mensch und Maschine liegen.

6.5 Denken

6.5.1 Neurophysiologische Aspekte menschlicher Denktaetigkeit

Die Analyse des Denkens aus Sicht der Neurophysiologie erfolgt auf der Grundlage einer Auffas sung, die das Denken gleichsetzt mit dem Bilden von Begriffen und Behauptungen, dem Formuliere und Lösen von Problemen und mit Vergleichs- und Umformungsprozessen (68). Denken erfolgt sowoh anschaulich (durch Bilder und Vorstellungen) als auch verbal (in Worten) sowie abstrakt (i Formeln). Denkprozesse basieren auf den Aktivitäten plastischer neuronaler Systeme, die vo Bunge auch als Psychonen bezeichnet werden(69), und sind in hohem Maße durch chemische Stoff beeinflußbar.
Die Begriffsbildung als wesentlicher Teil des Denkens, insbesondere die Neuschöpfung vo Begriffen, ist damit unmittelbar gebunden an plastische neuronale Systeme und vollzieht sic sowohl durch eine kontinuierliche Modifikation und Erweiterung von existierenden neuronale Strukturen als auch durch die Schaffung völlig neuer neuronaler Systeme. Vor allem die Bildung neuer Begriffe hängt von der Existenz eines plastischen Nervensystems ab, da die Entwicklung bislang nicht existierender Begriffe neue synaptische Verbindungen zwischen Neuronensystemen voraussetzt.

Die Formulierung von Aussagen oder Problemen erfolgt auf der Grundlage der gebildeten Begriffe. Aussagen lassen sich als Paarungen neuronaler Systeme oder neuronaler Gruppierungen verstehen, wobei eine sequentielle Anordnung von paarweise gekoppelten Neuronenkomplexe angenommen wird. "Das Ausdenken einer Aussage (eines Problems oder einer Anweisung) ist die sequentielle Aktivierung solcher Psychonen," (plastische neuronale Systeme, d.V.) "deren Aktivitäten mit den Begriffen korrespondieren, die in der vorgegebenen Ordnung in der Behauptung auftreten" (70). Ein Satz wird also gebildet durch die Aktivierung der neuronalen Muster spezifischer Begriffe; das Erfassung ihrer Bedeutung basiert demnach auf der alternierenden Aktivierung bestimmte Neuronensysteme. Dabei stellt sich ein Gedankengefüge als Verband miteinander vernetzten neuraler Systeme dar. "Insbesondere kann man deduktive Schlußfolgerungen als ein Emporsteiger auf bestimmten Zweigen eines solchen Verbandes auffassen, d.h. als die aufeinanderfolgende Aktivierung von Psychonen, die in den Verband eingebaut sind." (71)

s Denken ist jedoch nicht nur als Tätigkeit zu begreifen, die an die Aktivierung von pla-
ischen neuronalen Systemen gebunden ist, sondern impliziert darüberhinaus auch die Aktivierung
n motorischen und sensorischen Feldern. Die Annahme einer reinen Vernunft stellt für die
isten Neurophysiologen eine biologische Unmöglichkeit dar, da nicht nur sensorische Eindrücke
sentlicher Bestandteil des Denkens sind, sondern auch die Emotionen in den Denkprozeß inte-
iert sind. "Vernunft und Gefühl sind Aktivitäten unterschiedlicher, jedoch miteinander in
chselwirkung stehender Systeme." (72)

enfalls entscheidend für die menschliche Denkfähigkeit ist die parallele Verarbeitung von
rmprozessen, die, wie sich in der Bezeichnung "multiples Denken" von Neisser (73) nieder-
hlägt, als wesentlich betrachtet werden können für kreative Akte. In der Computertechnologie,
r allem in der KI-Forschung, bemüht man sich in zunehmendem Maße um die Entwicklung entspre-
ender Hardwaremöglichkeiten.

.e direkte Bindung des menschlichen Denkens an die plastischen neuronalen Systeme führt dazu,
ß Denkvorgänge, selbst formale, niemals völlig gleich sind, da jedes plastische neuronale
rstem, dauernden Modifikationen unterliegt. Damit seien, so Bunge(74), die logischen Formals-
:rukturen nicht als allein gültige Denkgesetze zu begreifen, da sie, zumindest vom Standpunkt
er Neurophysiologie aus gesehen, Strukturen darstellten, die den Besonderheiten des ZNS nicht
itsprächen. Die Diskussion der Frage, ob maschinelles Denken möglich ist, erhält auf der Basis
ieser Erkenntnisse neue Impulse, scheint doch, zumindest aus der Sicht einer streng materiali-
:ischen Position ein maschinelles Denken in dem Sinne, wie Menschen denken, nicht möglich zu
ein. Wie oben ersichtlich wurde, ist das menschliches Denken grundsätzlich gebunden an die
kistenz plastischer neuronaler Systeme. Das kreative Denken impliziert ja gerade die Bildung
öllig neuer neuronaler Strukturen, die auf der Fähigkeit des Nervensystems basieren, neue
endritische Fortsätze und neue synaptische Verbindungen bilden zu können. Die Plastizität des
ervensystems kann damit als die neurophysiologische Grundlage der menschlicher Lern-, Denk- und
reativitätsfähigkeit angesehen werden. Die bislang erzielten Resultate im Bereich maschineller
enktätigkeit zeichnen sich gerade durch diesen Mangel an schöpferischem Vermögen aus. Antizi-
ationen über mögliche Ergebnisses maschinellen Denkens bleiben - zumindest auf die heute
raktizierten technischen Methoden bezogen - begrenzt, da die materielle Basis für Innovation zu
ehlen scheint.

6.5.2 Kognition

Kognition ist in der Neurophysiologie, ähnlich wie in der Psychologie, gleichzusetzen mit der
onkreten oder begrifflichen Erfassung eines Objekts. Die Kognition kann sich auf Verhalten,
Wahrnehmung und die Erfassung von Begriffen beziehen; zusätzlich umfaßt sie Prozesse der
elbsterkenntnis, d.h. Wissen und Einschätzung des eigenen Verhaltens. Die Kognition wird als
irnprozeß begriffen, der als Teilbereich des Denkens ebenfalls an die Existenz plastischer
euronaler Systeme gebunden ist. Die Vielzahl der Dendritenverzweigungen ermöglicht dabei die
erknüpfung völlig unterschiedlicher Hirnfelder, etwa sensorischer, begrifflicher und motori-
scher Systeme. Kognitive Prozesse sind an Einsicht und Voraussicht gebunden. Durch die enge
Assoziation der maßgeblichen neuronalen Systeme an die entsprechenden Hirnregionen, insbesondere
den Vorderhirnlappen, fließen in jeden kognitiven Akt antizipatorische Elemente mit ein, die zur
nmittelbaren Einschätzung der Relevanz von Objekten und ihrer Bedeutung für Handlungsvollzüge
führen. Darüberhinaus ist durch die dendritischen Verzweigungen eine enge Anknüpfung an die
motionalen Zentren, etwa das limbische System, vorhanden; in die kognitiven Prozesse wirken
demnach immer auch emotionale Aspekte mit ein. Erkenntnis, Bewertung, antizipierte Handlung und
Emotion erscheinen damit im kognitiven Akt als untrennbar verwoben und charakterisieren die
Eigenarten menschlicher Kognition.
Reflektiert man diese neurophysiologischen Erkenntnisse unter dem Gesichtspunkt maschineller
Kognition, so kommt man wiederum zu dem Schluß, daß bereits die neurophysiologischen Bedingungen
kognitiven Verhaltens eine gleichwertige maschinelle Simulation unmöglich erscheinen lassen.
Nicht nur der Mangel an Plastizität im materiellen Substrat, sondern auch das Fehlen weitver-
zweigter Assoziationen zwischen unterschiedlichen Zonen und nicht zuletzt die Absenz eines
sensomotorischen Apparates verdeutlichen, daß maschinelle Kognition der menschlichen nicht
äquivalent sein kann.

6.5.3 Kreativität

Die Kreativität stellt eine der herausragendsten Leistungen des menschlichen Denkens dar. Sie
ist am stärksten von allen Hirnprozessen abhängig von der Existenz eines plastischen Nerven-

systems. So setzt man innerhalb der Neurophysiologie die Kreativität gleich mit der Entstehung neuer neuronaler Prozesse und der Bildung neuer Verknüpfungen zwischen den Systemen. Kreativität umfaßt in diesem Kontext:
- das Erfinden neuer Verhaltensweisen,
- das Ersinnen neuer Gedankengebilde,
- das Entdecken neuer Zusammenhänge
- primär innovative Leistungen.

Dabei ist jedes kreative Tun neurophysiologisch gebunden an die Enstehung einer neuen neuronalen Struktur. "Jeder kreative Akt besteht in der Aktivität eines neu gebildeten neuralen Systems bzw. ist er dessen Ergebnis" (75). Die kreativen Denkprozesse basieren auf früheren Lernerfahrungen, die quasi das Rohmaterial für den kreativen Akt darstellen. Wesentlich für die Kreativität ist das Durchbrechen existierender Assoziationen zwischen neuronalen Systemen bzw. die Bildung völlig neuer Verknüpfungen. Dies gründet auf der Fähigkeit des ZNS, neue Dendriten bilden zu können, die zu neuen synaptischen Verbindungen unterschiedlicher neuronaler Systeme führen. Zusätzlich hängt die Kreativität sehr stark von den autonomen Aktivitäten des ZNS ab, d.h. der von Außenreizen unabhängigen kontinuierlichen Erregung im Gehirn. Diese stellt gerade für die neuen Synthesen eine wesentliche Grundlage dar, als der Außenreiz nicht alleiniger Stimulans ist, sondern immer in Verbindung autonomer neuronaler Aktivitäten wirksam wird. Erneut offenbart sich die materielle Grenze für die Kreativität von Computern. Wiederum ist die Abwesenheit plastischer Strukturen zu nennen, wie auch das Fehlen von Eigenaktivitäten. Computer verfügen damit weder über eine materiell bedingte Flexibilität ihrer Verknüpfungen, noch können sie neue Strukturen schaffen. Der Mangel an Eigenreizen wie das Fehlen unmittelbarer, primär ungerichteter sensorischer Eindrücke stellt zudem eine gegenwärtige Barriere für maschinelle Kreativität dar. Auch auf der neurophysiologischen Ebene bestätigt sich damit, was später die psychologischen Erkenntnisse verdeutlichen: daß Kreativität nicht gesetzmäßigen Regeln folgt, sondern sich vielmehr durch ein ungerichtetes Assoziieren beliebiger Strukturen auszeichnet, die eben erst auf der Basis plastischer System möglich ist.

6.6 Das Bewußtsein

Aus materialistischer Sichtweise, im speziellen der emergentistischen Position, ist das Bewußtsein zu vergleichen mit einem Konglomerat aus einer Vielzahl neuronaler Systeme. Die verschiedenen Teilsysteme bilden nach diesem Konzept ein Hyper- oder Supersystem, in dem die unterschiedlichen Hirnfunktionen verankert werden. Ähnlich argumentiert Changeux(76), der das Bewußtsein gleichsetzt mit einem globalen Regulationszentrum, das auf die geistigen Repräsentationen und die stattfindenden kognitiven Operationen einwirkt. "Bei Bewußtsein sein heißt also, daß die Gesamtaktivität der Neuronen des Kortex und, allgemeiner, des Gehirns einem Regulationsprozeß unterworfen wird" (77). Das biologische Substrat des Bewußtseins sind kleine Neuronenkomplexe im Hirnstamm, die durch ihre hohe Divergenz der Axone einen weitreichenden Einfluß innerhalb des Gehirns haben und damit globale Wirkungen erzielen. Die vorrangige Aufgabe des Bewußtseins ist die "sinnvolle" Verknüpfung geistiger Objekte. Wenn auch die neurophysiologischen Erkenntnisse über das menschliche Bewußtsein noch sehr lückenhaft sind, so konnten doch bestimmte Faktoren ermittelt werden, die näheren Aufschluß über die Organisation und Funktionsweise des menschlichen Bewußtseins bieten.

Bestimmte Neurotransmitter, vor allem Acetylcholin und Dopamin, scheinen wesentlich zu sein für die willentliche Selektion von Signalen und die bewußte Steuerung der Aufmerksamkeit. Dopaminerge und cholinerge Neuronen "unterwerfen die Austauschprozesse zwischen Gehirn und Außenwelt einer sehr selektiven Kontrolle und sorgen für den ständigen Dialog zwischen der inneren Entfaltung der Gedanken und der für sie äußerlichen Wirklichkeit" (78). Eine damit zusammenhängende wichtige Funktion des Bewußtseins besteht darin, eine Analyse und Bewertung von Resonanzen und Dissonanzen zwischen Perzepten und Konzepten vorzunehmen, d.h. durch die Kontrolle der Verbindungen der geistigen Objekte die Wirklichkeit erfassen und bedeutungsmäßig interpretieren zu können. Das Bewußtsein erwächst danach aus dem Zusammenspiel miteinander verzahnter Regulationsprozesse.

Wesentlich für die Analyse des Bewußtseins ist die Frage, welche mentalen Aspekte unter diesen Begriff zu subsummieren sind. Dies impliziert beispielsweise das Problem, ob unterbewußte Denkvorgänge zum Bewußtsein zu zählen sind oder nicht. So lassen sich zwei unterschiedliche Positionen differenzieren, wobei die eine das Bewußtsein gleichsetzt mit dem Denken und Vorstellungsvermögen, während von der anderen Seite die Auffassung vertreten wird, nach der das Bewußtsein repräsentiert ist durch die Menge aller mentalen Zustände, worunter auch das Unbe-

ßte zu fassen wäre. Begreift man jedoch die Tatsache als charakteristisch, daß Bewußtsein eichzusetzen ist mit der Erkenntnis eines mentalen Vorgangs, so wird deutlich, daß im Erfassen r eigenen mentalen Abläufe das bewußte Ich als Instanz immer schon vorausgesetzt ist. Bunge rmuliert hier beispielsweise die Annahme, "daß ein Bewußtseinsvorgang eine Gehirnaktivität t, die darin besteht, eine andere Gehirntätigkeit zu überwachen (aufzuzeichnen, zu analysieren er aufzuspüren)" (79). Bewußtseinsvorgänge werden aus materialistischer Sicht gleichgesetzt t Aktivitätsvorgängen gewisser neuraler Systeme. Die traditionelle Frage, ob ein spezifisches wußtseinsorgan überhaupt existiert, wird heute eher verneint und stattdessen das Bewußtsein eichgesetzt mit einer spezifischen Klasse von neuralen Funktionen.

s Bewußtsein stellt eine evolutionäre Notwendigkeit dar (80), da in der menschlichen Phyloge- se für die immer komplexer werdenden Hirnfunktionen eine Kontrollinstanz erforderlich wurde.) werden Bewußtseinsvorgänge immer dann wirksam, wenn die Hirnfunktionen nicht mehr automatisch er reflexhaft ablaufen, sondern kognitive Einflußnahme erfordern. Dabei erweist sich Selbster- nntnis immer als bruchstückhaft, da niemals alle Hirnfunktionen vollständig bewußtseinsmäßig fasst werden. Schon Freud wies auf den Umstand hin, daß viele Wünsche und Motive uns selbst icht bewußt sind. Die bewußten und unbewußten Zustände existieren nebeneinander und entsprechen erknüpften Hirnzuständen. Innerpsychische Konflikte ließen sich danach als "Wechselspiel iteinander konkurrierender Rückkoppelungen in den neuronalen Schaltkreisen" (81) begreifen. as Bewußtsein ist unmittelbar gebunden an die Fähigkeit zur Selbsteinsicht, d.h. seiner selbst zw. der intern ablaufenden Vorgänge gewahr zu werden. Dies impliziert nicht nur Selbsteinsicht nd die bewußtseinsmäßige Erfassung eigener mentaler Prozesse, sondern zudem das Vorhandensein on Wille und Intention. Durch die willentliche und intentionale Steuerung eigener mentaler orgänge, die neurophysiologisch durch neuronale Systeme der Stirnlappen repräsentiert sind, erfügt der Mensch über die Fähigkeit, sein eigenens bewußtes Denken selbst zu determinieren. as absichtsvolle Handeln, welches als ein besonderes Merkmal von Bewußtseinsprozessen begriffen erden kann, basiert auf der sinnvollen Verknüpfung von Vorstellungen und Konzepten. Die ntizipation und Voraussicht sowie schöpferische Prozesse wie Kreativität und innovatives Denken ählen ebenso zu den Bewußtseinsleistungen wie vergleichende und bewertende Funktionen. Doch mfaßt das Bewußtsein nicht nur kognitive und regulierende Aktivitäten, sondern ebenso die efühlswelt. Durch die vielfältigen Beziehungen der verschiedenen Hirnregionen zu Hypothalamus nd limbischem System wird offenbar, daß das Gefühl als Existenzweise des Bewußtseins gewertet erden muß und in viele der steuernden und regelnden Aufgaben des Bewußtseins mit einfließt.

as entscheidendste Kriterium des Bewußtseins scheint jedoch die Selbsteinsicht zu sein. Mit der ahrnehmung der eigenen mentalen Vorgänge wird der Mensch sich seiner gewahr; mit der Gewahrwer- ung seiner selbst und dem Bewußtsein seiner mentalen Zustände wird der Mensch zur Person, zum ewußten Ich. Die entscheidende Fähigkeit, die für die Existenz von Bewußtsein das qualitative erkmal darstellt, ist das Vermögen, sich selbst zu denken.

ie Frage, inwieweit Bewußtsein an die besonderen Eigenschaften des ZNS gebunden ist, d.h. an ie physikalische und chemische Informationsübertragung, die Plastizität des Nervensystems, die annigfaltige dendritische Verzweigung und damit einhergehende weite Vernetzung von Neuronenkom- lexen untereinander sowie die phylogenetische Entwicklung des Menschen und seines Bewußtseins, muß aufgrund der immer noch sehr begrenzten Informationen dahingestellt bleiben. Daß keine der gegenwärtigen Computersysteme über eine Form des Bewußtseins verfügt, wird wohl auch von den euphorischsten KI-Forschern zugegeben. Doch weist beispielsweise Kent(82) darauf hin, daß die Existenz eines Bewußtseins nicht unbedingt gekoppelt sein muß an das biologische Substrat des menschlichen Gehirns."It seems unlikely that the constituents at the elemental level would be important. It is hard to conceive that the nature of mind is such that carbon, hydrogen and oxygen as opposed to silicon, copper and gold determine its occurence or nonoccurence" (83). Wenn auch sicher mit Kent darin übereingestimmt werden kann, daß diese Grundsubstanzen nicht die Entscheidung darüber beinhalten, ob maschinelles Bewußtsein prinzipiell möglich ist, so scheinen doch bestimmte biologische Besonderheiten, wie die Fähigkeit zur Veränderung des materiellen Substrats und zur Selbstorganisation sowie die raum-zeitliche Informationscodierung und vor allem das hohe Maß an Konnektivität, von entscheidender Bedeutung zu sein für die spezifische Ausprägung des menschlichen Bewußtseins. Ebenso relevant ist die dauernde, zum Teil durch externe Reize, zum Teil durch autonome neuronale Aktivität hervorgerufene Dauererregung des ZNS, die unser Bewußtsein als kontinuierlichen Prozeß von Aufmerksamkeit kennzeichnet. "The nature of our mental experience is deeply involved with the occurence of an ongoing process" (84).

Wenn auch die Frage nach einer möglichen Existenz maschinellen Bewußtseins zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht geklärt werden kann, so scheinen doch aus neurophysiologischer Sicht Hinweise

dafür zu existieren, daß - sollte es irgendwann einmal eine Form maschineller Bewußtheit geben - diese von der menschlichen verschieden sein wird. Erst dann jedoch könnte einer Maschine Bewußtsein attestiert werden, wenn sie die Fähigkeit besäße, sich selbst zu denken.

6.7 Eine Gegenüberstellung von Mensch und Maschine

Die Frage, ob es ein maschinelles Bewußtsein geben kann, d.h. eine dem menschlichen Bewußtsein vergleichbare psychische Ebene in einem Computerprogramm vorstellbar ist, impliziert die Notwendigkeit eines Vergleichs zwischen Gehirn und Computer. Entgegen der Auffassung des reduktionistischen Materialismus, der von einer Gleichartigkeit von Gehirn und Computer ausgeht, lassen sich auf der Basis eines emergentistisch materialistischen Standpunktes grundlegende Differenzen hervorheben.
Dabei lassen sich zunächst drei wesentliche Unterschiede zwischen der Hardware eines Computersystems und dem menschlichen Nervensystem identifizieren

1. Während die Informationsverarbeitung in Computersystemen lediglich auf physikalischem Wege erfolgt, sind für die menschliche Informationsvermittlung zwei Systeme entscheidend:
   - die topologische Kodierung der Verknüpfungen im Neuronennetzwerk;
   - die Kodierung durch elektrische Impulse und chemische Signale.

Aufgrund dieser Besonderheit des menschlichen Nervensystems ist die Anzahl möglicher Zustände im Gehirn ungleich größer gegenüber den maschinellen Systemen, d.h. Nuancierungen von Informationen einerseits wie auch die Integration unterschiedlichster neuronaler Systeme in eine Informationskette sind als charakteristisch zu begreifen für die menschliche Form der Informationsverarbeitung gegenüber einer ausschließlich durch zeitliche Impulsmuster codierten maschinellen Informationsverarbeitung.

2. Als weiterer differierender Faktor läßt sich die Anatomie des Gehirns anführen, das aufgrund der Fähigkeit zur Bildung neuer Strukturen, d.h. der Entwicklung neuer Dendriten an einem Neuron und dem Vermögen autonomer neuronaler Aktivität, zur Plastizität und Selbstorganisation in der Lage ist und sich durch eine weitverzeigte Konnektivität der neuronalen Systeme auszeichnet.

3. Das menschliche Gehirn arbeitet nicht nur sequentiell, sondern zumeist parallel, d.h. multiple mentale Operationen sind zur gleichen Zeit möglich, so daß unterschiedliche Ansätze und Strategien nebeneinander abgearbeitet werden können.

Diese Divergenzen bedürfen weiterer Erläuterungen. Eine spontane Aktivierung, wie sie für die Neuronen typisch ist, ist in heutigen Computern nicht realisierbar. Die Eigenart des menschlichen Gehirn, auch ohne Außenreize einem ständigen internen Informationsfluß zu unterliegen, markiert damit einen qualitativen Unterschied gegenüber den Schaltkreisen im Computer.

Die Verbindungen zwischen den Neuronen sind plastisch und variabel. Gegenüber den statischen Verknüpfungen von Computerelementen stellt diese Tatsache einen qualitativen Unterschied dar, der in all jenen kognitiven Bereichen zum Tragen kommt, die schöpferische Elemente in sich bergen. Die Fähigkeit zur Neubildung von neuronalen Systemen stellt die Basis dar für kreative Prozesse, für das Lernen und für eigenständig-innovative Denkvorgänge. Diese morphologischen Änderungen beziehen sich auf das Anwachsen neuer dendritischer Verzweigungen und auf Modifikationen an den Synapsen. Durch diese materiellen Umwandlungsprozesse entstehen die Bedingungen für die Bildung neuer neuronaler Systeme und neuer Konnektionen: das Gehirn verfügt also über emergente Fähigkeiten. Demgegenüber sind die Verbindungen zwischen Computerbausteinen statisch, sie erfahren keine materiellen Modifikationen und können nicht eigenständig Verknüpfungen vornehmen. Alle Veränderungen sind also lediglich softwaremäßig zu realisieren, wobei die Frage noch nicht geklärt werden kann, inwieweit damit isomorphe Strukturen zum menschlichen Gehirn geschaffen werden können.

Doch die Emergenz des menschlichen Gehirns basiert nicht nur auf intern ablaufenden Prozessen; das Gehirn ist zur Öffnung gegenüber seiner sozialen und kulturellen Umwelt insofern in der Lage, als die Reizvielfalt des jeweiligen Umfelds entscheidend zu sein scheint für die Anzahl morphologischer Veränderungen. Eine reizarme Umwelt bewirkt ein verzögertes und reduziertes Wachstum an dendritischen Verzweigungen, während mannigfaltige Stimulationen zu einer deutlichen Vermehrung führen. Das Gehirn ist damit, vor allem durch die Existenz seines sensomotorischen Systems, als offenes System zu begreifen, das dauernder Stimulation unterliegen kann. Dabei findet eine stete Selektion der externen Reize durch bewußtseinsmäßige Vorgänge statt, die an die Fähigkeit

· Bewertung und Antizipation gebunden sind. Ein Computersystem, zumindest die heutigen elle, sind dagegen geschlossene Systeme, sie sind nicht zur unabhängigen Reizaufnahme und rarbeitung in der Lage, geschweige denn, dass sie bewertende Selektionen von Stimuli vornehn koennen. Ob mit der Konzeption sogenannter "Hand-Auge-Maschinen" bzw. noch komplexerer steme ein offenes maschinelles System realisiert werden kann, bleibt abzuwarten, doch stellt · sensomotorische Apparat des Menschen eine kaum simulierbar scheinende Hürde dar.

nputer sind nur zu physikalischen Reizinterpretationen in der Lage. Die Perzeption einer inen Fläche beispielsweise erfolgt über die isolierte Wahrnehmung der einzelnen Atome. nschen dagegen sind zur holistischen Betrachtung in der Lage, d.h. sehen die grüne Fläche als samtes. Diese ganzheitliche Betrachtungsweise basiert nach Bunge (85) auf den in neuronalen stemen geschlossenen Verbunden von Neuronen, die kontinuierlich zusammenwirkend den jeweiligen druck hervorrufen. Untersuchungen über holistische Repräsentationen im menschlichen Gehirn d jedoch noch in den Anfängen begriffen, so daß die Zukunft hier womöglich weitere entscheie Differenzen zwischen menschlicher und maschineller Informationsverarbeitung zu Tage bringt.

nge begreift als weiteres Argument gegen eine angenommene Analogie zwischen Gehirn und nputer die Lebendigkeit des Menschen. "Computer sind nun einmal keine lebenden Wesen, so nen sie zwar einige Aspekte des Nachdenkens imitieren, in Wirklichkeit denken sie natürlich cht nach" (86). Das Gehirn ist ein komplexes Biosystem, daß nicht mit den mechanischen rukturen einer Maschine zu vergleichen ist. Die Unterschiedlichkeit von Mensch und Maschine rd offenbar, wenn man die biologischen Prozesse bei Gedächtnisbahnung und Lernvorgängen trachtet. Die Neubildung von Nucleinsäuren durch eine leichte Verschiebung der Codierungen für inosäuren im RNS stellt beispielsweise eine der biologischen Grundlagen des menschlichen dächtnisses dar, die einen fundamentalen Unterschied zu den maschinellen Prozessen aufzeigen. nnoch wird dieses Argument zu Recht oft als nicht hinreichend betrachtet für eine grundsätzche Ablehnung der Annahme, daß eine maschinelle Form von Bewußtsein denkbar sein könnte.

trachtet man unmittelbar die neuronale Ebene, so fällt auf, daß Neuronen nicht nur physikalihe Eigenschaften haben, sondern auch biologische und chemische. Neuronen sind zu Veränderungsd Umwandlungsprozessen in der Lage, d.h. sie können neue Verzweigungen bilden und in weit itfernte Hirnregionen wachsen, sofern ein biologischer Bedarf besteht. Sie sind damit den atischen, ausschließlich nach physikalischen Prinzipien arbeitenden Schalttransistoren nicht quivalent. Zudem weist ein Neuron bis zu 1000 Dendriten auf, d.h. es kann mannigfaltige nformationen über seine Synapsen aufnehmen (87). Demgegenüber handelt es sich bei einem halttransistor - sofern man es hier als legitim betrachtet, Neuron und Transistor miteinander vergleichen, was nicht ganz unproblematisch ist - um einen einfachen Ein-Aus-Schalter, der diglich eine Information verarbeiten kann. Zudem stellen die Neuronen mit ihren Verzweigungen d ihrer besonderen Wachstumsweise eine dreidimensionale Konfiguration dar (88); sie bilden äumliche Gestalten, insbesondere in ihrem neuronalen Verbund. Dieser Aspekt mag ebenso bedeutam erscheinen wie die zuvor aufgeführten, doch existieren bislang nur ungenaue Kenntnisses arüber, so daß hier nicht näher darauf eingegangen werden soll.

ie Plastizität interneuronaler Verbindungen, wie sie für das menschliche ZNS typisch ist, tellt einen weiteren Unterschied dar zwischen Mensch und Maschine. Die Annahme, sämtliche eistigen Operationen seien in ihrer Mannigfaltigkeit reduzierbar auf Rechenoperationen, läßt ich gerade deshalb nicht halten. Morphologische Veränderungen sind ja gerade die Basis für elbstorganisierende Prozesse, die von so entscheidender Bedeutung sind für alle höheren eistigen Fähigkeiten des Menschen, ja für das menschliche Bewußtsein überhaupt.

in Computer - zumindest vom gegenwärtigen Status aus gesehen - befindet sich immer in einem indeutig definierbaren Zustand; dies trifft für das menschliche Nervensystem nicht zu. Das ehirn produziert kontinuierliche Eigenaktivität und hat keinen festgelegten Zustandsraum, da es ortwährend Systeme schafft und eliminiert. Veränderungen sind nicht festgelegt, sondern in ohem Maße zufällig und variabel. Die geistigen Objekte sind dauernden internen und extern edingten Modifikationen unterworfen. Die mentale Repräsentation eines Objekts erscheint so iemals völlig gleich, weder intra- noch interpersonell. Das Gehirn verfügt zudem über die ähigkeit, unbeständige, vorläufige Repräsentationen zu bilden. Die damit einhergehende Varialionsbreite und Vielfältigkeit der mentalen Objekte scheint für schöpferische Prozesse ganz ntscheidend zu sein. Die selektive Stabilisierung erfolgt erst allmählich durch Bewertungs- und ontrollprozesse, d.h. Vorgänge, die dem menschlichen Bewußtsein und seiner Kontrolle der entalen Prozesse entsprechen.

Die mentalen Repräsentationen des menschlichen Gehirns sind unterschiedlicher Art; sie lassen sich global unterscheiden als Vorstellungen mit einer sensorischen Komponente und als Konzepte. Die Lokalisation der Repräsentation entscheidet dabei über den Abstraktionsgrad bzw. über das Maß an Gegenständlichkeit des mentalen Objekts. Die unterschiedlichen Hirnfelder, etwa die sensorischen oder motorischen Felder, stellen aber Dimensionen dar, die an einen lebenden Organismus gebunden sind. Repräsentationen in Computern mangelt es immer an eben jener Gegenständlichkeit oder Lebendigkeit, die den menschlichen Vorstellungen immanent ist.

Die phylo- und ontogenetische Entwicklung des Gehirns schlägt sich in seinen neuronalen Konnektionen nieder. Diese Einflüsse sind an das Gehirn als biologisches System gebunden und damit von einer Maschine nicht nachzuahmen. In den folgenden Kapiteln wird jedoch noch deutlicher werden, daß jenes "phylogenetische Erbe" für die bewußtseinsmäßigen Operationen des Menschen von grundlegender Bedeutung ist.

Die häufig vorgenommene Gleichsetzung von Gehirn und Maschine (90) (91) führt entweder zu einer physikalischen Reduktion des Geistes, oder aber zu einer dualistischen Auffassung wie beispielsweise bei Eccles (92), der das Bewußtsein nicht im Gehirn verankert sieht. Die Gleichsetzung von Gehirn und Maschine führt damit zu zwei verschiedenen Positionen:
- der Negation des Bewußtseins,
- der Verlagerung des Bewußtseins in transzendentale Dimensionen.

Die Gleichsetzung von Computern mit dem menschlichen Gehirn impliziert die Auffassung, daß der Geist mit der Software zu vergleichen ist. Diese Analogie verkennt völlig die komplexen Fähigkeiten des menschlichen Gehirns, insbesondere sein Vermögen zu selbstorganisierten Prozessen. Ein Computer kann weder biologische Funktionen ausüben, noch Aktivität aus sich selbst heraus entfalten, d.h. eine von Außenreizen unabhängie eigene Stimulation realsieren, wie sie für das Gehirn typisch ist. Die Spontanaktivität des menschlichen Gehirns, die auf neuronalen Oszillationen und der weitverzweigten Konnektivität der Neuronensysteme und ihrem steten internen Informationsaustausch basiert, stellt eine ganz wesentliche Komponente für alle Hirnprozesse dar, da keine Vorgänge isoliert ablaufen, sondern immer beeinflußt sind von den autonomen Prozessen im menschlichen Gehirn. Durch die selbstorganisierten Prozesse werden mit Rekombinationen neue Konzepte gebildet, indem Vorstellungen, existierende Konzepte und die mentale Antizipation von Zukünftigem zusammenwirken. Die Selbstorganisation des Gehirn läßt sich somit als Rekombination und Selektion durch Resonanz und Dissonanz beschreiben.

Insgesamt gesehen haben Computer somit keine dem Menschen vergleichbaren psychischen Eigenschaften. Betrachtet man zuletzt die phylo- und ontogenetische Entwicklung des Menschen, so läßt sich diese als kontinuierliche somato-psychische Entfaltung beschreiben, d.h. somatische Engramme werden modifiziert zu psychischen Engrammen, die als mentale Muster im Gehirn gespeichert werden. Diese somatopsychische Entwicklung, die ihren Niederschlag in der Bildung und Wandlung von neuronalen Systemen findet, ist an die Existenz eines biologischen Systems gebunden, kann also damit nicht in einem Computer - zumindest in seiner gegenwärtigen Ausprägung - stattfinden. So ergibt sich aus neurophysiologischer Sicht die Annahme, daß heutige Computersysteme deutliche materielle Defizite gegenüber dem menschlichen Gehirn aufweisen. Zukünftige Maschinen, die auf ähnlichen Konzepten basieren wie die gegenwärtigen Systeme, werden so - sofern dies überhaupt möglich ist - eine andere Form von "Bewußtsein" haben als der Mensch. "A machine built along the lines of our present computing machinery would be unlikely to have conscious experience on the basis of any similarity of the brain" (93). Die Zukunft wird zeigen, welche Entwicklungen mit Computern realisiert werden können.

kognitiven Fähigkeiten des Menschen:
chologische Erklärungsansätze über Wissen und Problemlösen

sychologische Konzepte ueber das menschliche Denken

l die Psychologie sich seit langem mit der Analyse des Denkens beschäftigt, läßt sich ng kaum eine allgemeingültige Erklärung finden für diejenigen mentalen Prozesse des hen, die unter diesem Begriff subsumiert werden. Übereinstimmung besteht lediglich darin, enken als komplexen, vielgestaltigen mentalen Prozeß aufzufassen. Dennoch existieren einige ze, die Hinweise auf das Bedeutungsumfeld dieses Wortes geben.

ls wird das Denken gleichgesetzt mit dem mentalen Vollzug von Handlungen; dieser Auffassung rach schon Freud (1) mit dem von ihm geprägten Begriff des 'Probehandelns'. Haber (2) griff Vorstellung wieder auf, indem er das Denken verglich mit internen, impliziten Aktionen von ssen, die mental antizipiert werden. Damit wird es als Kausalfaktor für menschliches lten begriffen. Diesem globalen Konzept entgegengesetzt ist eine weitverbreitete Auffas-, die das Denken zu erklären versucht durch die Aufzählung verschiedener kognitiver Fähig-n, die mit diesem Begriff verknüpft werden. Bourne und andere (3) vertreten eine derartige tion, indem sie Denken als Oberbegriff für die Kompetenzen setzen, das Gedächtnis adäquat zu tzen, Ereignisse zu antizipieren, Möglichkeiten zu imaginieren und motorische, perzeptive symbolische Engramme zu manipulieren.

(4) dagegen lehnt die Aufgliederung des Denkens in allgemeine und wiederkehrende Tätigkeiab, "Es gibt keine elementaren Tätigkeiten, die man allgemein und als charakteristisch ... das Denken ansetzen kann." (5). Er bezeichnet den Versuch der Psychologie als Fehler, ale Akte zu isolieren, die nicht zu isolieren sind. Entsprechend begreift er das menschliche en als Synthese unterschiedlichster Fertigkeiten, Antizipationen und Intuitionen, die erst hrem Zusammenwirken jene für das Denken charakteristische Besonderheit schüfen, die es zu r Kunst werden ließen.

Ursprünge der Auffassung, man könne das menschliche Denken formalisieren, sind innerhalb der hologie der sogenannten Würzburger Schule zuzuordnen. Deren Vertreter äußerten die Überzeu-, daß Denkprozesse durch rationale und logisch verknüpfte Elemente auszudrücken seien. Diese langjähriger philosophischer Tradition gründende Annahme gipfelt in der Überzeugung, daß diejenigen kognitiven Vorgänge als Denken zu bezeichnen sind, die mit den Gesetzen der alen Logik auszudrücken sind. Untersuchungsergebnisse sowie nicht zuletzt die Ergebnisse der orschung zeigten jedoch, daß mit den Mitteln der formalen Logik das menschliche Denken nicht reichend repräsentiert werden kann.

der Bezeichnung 'Produktives Denken' (6) beschreibt die Gestaltpsychologie jene Form von ken, die über das bloß mechanische Operieren hinausgeht. "Produktives Denken überschreitet in jedem Falle das Niveau der zuvor erworbenen Gewohnheit oder Geschicklichkeit" (7). Diese n des Denkens beinhaltet einen kreativen, eigenständigen Akt; Problemlösungsprozesse werden vom Subjekt selbst entwickelt, ohne daß auf zuvor Determiniertes zurückgegriffen wird. Das öpferische Denken zählt zu den höchsten kognitiven Leistungen des Menschen, beinhaltet jedoch lang viele unerforschte und undurchsichtige Aspekte.

ieht man den Begriff des Denkens auf die Alltagserfahrung, so impliziert es hier zunächst die tale Vergegenwärtigung der Welt, d.h. die innere Repräsentation der äußeren Wirklichkeit. it fällt die Begriffs- und Kategorienbildung unter den Begriff des Denkens ebenso wie die izipierte Handlung und das schöpferische Bewältigen von Problemsituationen.

menschliche Denken ist grundsätzlich ebensosehr von Vorstellungen getragen wie von abstrak- Konzepten, d.h. es beinhaltet sowohl Impressionen als auch Ideen (8). Eine Formalisierung menschlichen Denkprozesse verkörpert daher lediglich eine unvollständige Abbildung des kaktes, da sich Vorstellungen, die immer noch sensorische Elemente ihrer Ursprungsperzepte in h bergen, schon deshalb jeglicher Formalstruktur widersetzen, weil sie subjektspezifische gramme von Wahrnehmungsprozessen darstellen. Das vorstellungsmäßige Denken, das sowohl für logieschlüsse als auch für Verstehensprozesse von fundamentaler Relevanz ist, läßt sich nach nicht unmittelbar durch eine Formalsprache repräsentieren, fehlt also in allen derart

konzipierten Denksystemen völlig.
Die Nichtformalisierbarkeit des Denkens wird von Kintsch auch im Zusammenhang mit der Modellbildung über Sprache hervorgehoben, die er als wesentlichen Faktor für das menschliche Denken begreift. "To propose formal logic as a model for language only means forcing language into an intolarable straight- jacket" (9). Dagegen hebt Wygotsky(10) hervor, daß der Gedanke bzw. das Denken sich sehr viel eher für eine formallogische Repräsentation eigne, als dies für die Sprache zuträfe. Die hier offenbar werdende Divergenz gründet auf einem traditionellen Disput innerhalb der Psychologie und Philosophie, der der Frage gilt, ob die Sprache als Voraussetzung für das Denken zu gelten habe oder ob sprachunabhängige Denkvorgänge vorstellbar seien. Diese Problemstellung ist besonders unter dem Blickwinkel der Intention von Interesse, menschliches Denken, das ja nur durch seine Verbalisierung potentiell strukturiert werden kann, durch Maschinen nachzubilden.

Die Ideen innerhalb der Künstlichen Intelligenz-Forschung bewirkten neue Anstösse für die Reflexionen über das menschliche Denken. Aufgrund der partiellen maschinellen Simulierbarkeit verschiedener Fähigkeiten von Menschen nehmen viele KI-Forscher an, daß nicht nur die Zergliederung des menschlichen Denkens in Einzelaspekte legitim sei, sondern überdies in absehbarer Zeit maschinelles Denken in einer äquivalenten Komplexität wie das menschliche zu realisieren ist.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden einige der herausragenden kognitiven Leistungen von Menschen näher untersucht, wobei diejenigen Fähigkeiten besondere Beachtung finden werden, die unter die Oberbegriffe Wissen und Problemlösung zu fassen sind.

7.2 Theoretische Basis

Zwei Richtungen innerhalb der Psychologie beschäftigten sich in besonderem Maße mit Wahrnehmungen und Denkprozessen beim Menschen: die Gestaltpsychologie und die Kognitionspsychologie. Beide vertreten unterschiedliche Konzepte über die Kognition, die in ihrer Synthese Aufschluß geben über die Besonderheiten menschlicher Fähigkeiten.

Die Gestaltpsychologie (11)(12)(13) ist als Theorie zu beschreiben, die sich vehement gegen die behavioristische Aufgliederung des Bewußtseins in Einzelelemente wandte und dagegen ein ganzheitliches Konzept setzte. Wahrnehmung und Denken wurden hier als gestalthafte Prozesse begriffen, die nur in ihrer Ganzheit zu erfassen seien. Gestaltpsychologen vertraten die Auffassung, daß Strukturen und Organisationen spontane, nicht vorgeprägte Gegebenheiten des Bewußtseins darstellten. Dabei nahm man an, daß die Art der Organisation von Informationen die Wahrnehmung determiniere, das Einzelne also durch das Ganze bestimmt werde und seine besondere Bedeutung erst durch die gestalthafte Konfiguration erhielte, in der es sich befinde. (14) Dahinter verbirgt sich die prinzipielle Annahme, daß das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile. Wahrnehmungen und Denkprozesse zeichnen sich demnach durch gestalthafte Strukturierungen aus. Dabei werden Gestalten als bedeutungsvolle, sinntragende Konfigurationen betrachtet, die nicht aus Einzelelementen gebildet werden, sondern nach Auffassung der Gestaltpsychologie im Erlebnis primär und unmittelbar gegeben sind. "Erst sekundär können in analytischer Einstellung aus ihnen die Elemente als 'Teilganze' ausgegliedert und isoliert werden" (16). Denken wird hier gleichgesetzt mit der Umstrukturierung konkreter und abstrakter Wahrnehmungsfelder; der Prozeß der Problemlösung erscheint in diesem Kontext als das einsichtige Erkennen eines neuen Gestaltzusammenhangs. Die Gestaltpsychologie markierte zwei grundlegende Gesetze:
- das Gesetz der Nähe, nachdem Elemente als gruppiert wahrgenommen werden;
- das Gesetz der Ähnlichkeit, nachdem ähnliche Elemente als gruppierte identifiziert werden.

Die Organisation von Informationen determiniert dieser Auffassung nach die jeweilige Wahrnehmung. Statt einer atomistischen Sichtweise wird hier also die Überzeugung vertreten, daß das menschliche Bewußtsein "consists of an organized but dynamic and ever changing field of events which interact or mutually affect each other" (17). Reaktionen beziehen sich demnach nicht auf isolierte Reize, sondern auf Konfigurationen. Objekte werden als Kombinationen und Relationen von Merkmalen wahrgenommen und nicht als Summe von Einzelmerkmalen begriffen. Wahrnehmungen, Denkprozesse und Emotionen sind damit nach Auffassung der Gestaltpsychologie nur in ihrer Ganzheit erfahrbar.

Die Informationstheorie, die in den Fünfziger Jahren eine besondere Bedeutung in der Erforschung

schlicher Denkvorgänge einnahm, richtete ihr Augenmerk vornehmlich auf den Prozeß der ierung und Decodierung von Informationen, der als wesentliche Grundlage des Denkens angesehen de. "Denken wird hier als Aktivität eines Systems menschlicher Informationsverarbeitung ehen, das ein begrenztes Fassungsvermögen hat, in aktiver Weise Informationen von einer Form die andere verwandelt und das in gleicher Weise auf der Grundlage seines eigenen, internen sens wie auf der der äußeren Umgebung antwortet." (18). Dieser Forschungsrichtung liegt die fassung zugrunde, daß der Mensch als informationsverarbeitendes Wesen zu begreifen ist und nit über grundsätzlich vergleichbare interne Strukturen verfügt wie beispielsweise ein puter. Entsprechend wurde von der Informationstheorie der Computer als Mittel zur Theoriebil- g eingesetzt, mit dessen Hilfe man sich genauere Kenntnisse über die kognitiven Prozesse des schen erhoffte. Die menschliche Informationsverarbeitung wird global als Adaptionsvorgang an e mannigfaltige Umgebung begriffen. "The apparently complex behavior of the information cessing system in a given environment is produced by the interactions of the demands of that ironment with a few basic parameters of system particularly characteristics of its memories"). Direkt assoziiert ist die Kognitionspsychologie, die gegenwärtig vorherrschende Richtung der Denkpsychologie, die in den letzten Jahren eine zunehmende Bedeutung erlangte und eine ge inhaltliche Beziehung zur Künstlichen-Intelligenz-Forschung hat. "Kognitionspsychologen en einige ihrer wichtigsten Theoreme aus Anregungen von Forschungen über Künstliche Intel- genz gewonnen" (20). So wurden viele Konzepte der KI als Basis von Theorieentwicklungen ernommen, wie am Beispiel der Wissensrepräsentation und der Problemlösung später noch deutlich den wird.

e Kognitionspsychologie setzt den Begriff der Kognition gleich mit den im Gedächtnis veranker- n Informationen; als kognitive Prozesse werden die Aufnahme, das Behalten und die Verwendung eser Informationen bezeichnet. Sie basiert auf einer erfahrungswissenschaftlichen Methode, die eoriebildung erfolgt demnach überwiegend als Folge von Beobachtungen. Eine Grundannahme dieses satzes ist, "daß kognitive Prozesse in geregelter Weise strukturiert sind", (21).

lgende Prinzipien können hier als charakteristisch aufgefaßt werden:

die Kognitionspsychologie zielt auf die Explikation des kognitiven Verhaltens in Alltagssituationen;
die Introspektion als Methode wird nur für begrenzt valide gehalten, da die Verbalisation von intern ablaufenden Prozessen nicht immer eine gültige Äußerung der kognitiven Prozesse darstellt;
man geht von der Annahme aus, daß kognitive Prozesse auf einer Ebene analysiert werden können, die physiologische Faktoren außer Acht läßt;
die Kognitionspsychologie strebt nicht danach, logische oder andere Formalstrukturen zu bestimmen, mit denen eine formalisierte Darstellung der kognitiven Prozesse realisiert werden soll.

r Mensch wird im Rahmen dieser Konzeption als informationsverarbeitendes System betrachtet. Computer wie Menschen können als Systeme der Informationsverarbeitung aufgefaßt werden, die formationen enkodieren, speichern, wieder abrufen und manipulieren" (22). Diese Auffassung rechtigt zur häufig praktizierten Theoriebildung bzw. -überprüfung mit Computern und offenbart n engen Bezug zwischen Kognitionspsychologie und Künstlicher Intelligenz. Da die eine Richtung re theoretischen Annahmen oftmals mit Konzepten und Resultaten der jeweils anderen Richtung gründet, existieren verwandtschafliche Beziehungen zwischen beiden Forschungsrichtungen. nnoch offenbarten die Untersuchungsergebnisse von Kognitionspsychologen gerade im Bereich der issensverarbeitung und Problemlösung Aspekte menschlichen Verhaltens, die Grenzen der bisheri- en maschinellen Entwürfe offenbarten. Infolgedessen werden kognitionspsychologische Annahmen inen wesentlichen Schwerpunkt in der folgenden Darstellung bilden.

.3 Die kategorielle Wirklichkeitserfassung des Menschen

.3.1 Kategorisierung von Informationen

ine grundlegende kognitive Struktur des Menschen bezieht sich auf seine Fähigkeit, die Wirk- ichkeit geordnet zu erfassen. Dies basiert im Wesentlichen auf einem gerichteten Umgang mit der ülle an Informationen, die tagtäglich auf den Menschen einwirken. Im Folgenden werden einige esentliche Aspekte der kognitiven Erfassung von Wirklichkeit dargestellt und unter dem Ge- ichtspunkt einer potentiellen maschinellen Simulierbarkeit diskutiert.

Für die Informationsverarbeitung und das Erkennen von Objekten erweisen sich Kategorien als grundlegende Elemente. Kategorien implizieren Generalisierungs- und Differenzierungsvorgänge, bei denen bestimmte Objekte als zugehörig zu spezifischen Kategorien begriffen werden. Damit stellen sie kognitive Instrumente zur Reduzierung der Stimulusvielfalt und zur Ordnung von Wahrnehmungen dar. Es handelt sich also um Klassen äquivalenter Stimuli, deren Entstehung auf Lernvorgängen sowie auf genetische und erfahrungsbasierte Faktoren zurückzuführen ist.

Kategorien beinhalten Verknüpfungen von Attributen, die als charakteristisch für das entsprechende Objekt oder die Objektklasse angesehen werden. Man unterscheidet zwischen logisch trennscharfen und überlappend unpräzisen Kategorien. Sie können beliebig viele Mitglieder haben und eine variable Anzahl von Attributen aufweisen. Diese Attribute sind für eine Kategorienbeschreibung notwendig, da das Wiedererkennen von Informationen nach Auffassung von Kognitionspsychologen(23) nicht möglich ist ohne die Analyse von Einzelmerkmalen einer Kategorie.

Die Attribute einer Kategorie sind keine isolierten Merkmale, sondern weisen Verknüpfungen untereinander auf, die durch Regeln determiniert werden. So lassen sich affirmative Regeln (ein spezielles Attribut definiert eine Kategorie) von konjunktiven Regeln (mehrere Attribute determinieren eine Kategorie) unterscheiden. Ebenso sind logische Verknüpfungen von Attributen denkbar, die den Junktoren der formalen Logik entsprechen und für Kategorien der Mathematik beispielsweise typisch sind. Häufiger sind jedoch unscharfe Kategorien, die keine qualitative, sondern eine quantitative Abgrenzung gegenüber anderen Kategorien aufweisen, d.h., daß die "Zugehörigkeit zu natürlichen Kategorien eine Frage des Grades und nicht des Alles-oder-Nichts ist" (24). Die menschliche Wirklichkeitserfassung läßt sich demnach als Annäherung an Kategorien beschreiben, die den variablen, kontextabhängigen Kategoriegrenzen des Alltagswissens eher entsprechen als die streng logisch konfigurierten Kategorien. Die Flexibilität der alltäglichen, kognitiven Prozesse basiert ja darauf, daß Kategorien kontextgebundene Größen darstellen, so daß unterschiedliche Objektklassifikationen gemäß den jeweiligen Kontexten möglich sind.

Die typische Kategorie beinhaltet spezifische Attribute, die definitorisch sind, also für alle Mitglieder einer Kategorie gleichermaßen gelten. Diese Beschreibung ist jedoch theoretischer Art, da im Alltagsleben oft keine Einigkeit über die Attribute von Kategorien erzielt werden kann. Wittgenstein wies bereits darauf hin (25), daß die Mitglieder einer Kategorie in einer Beziehung der Familienähnlichkeit zueinander stehen; lediglich Subgruppen von Kategorien weisen gemeinsame Attribute auf, beinhalten aber auch Überschneidungen zu anderen kategorialen Subgruppen. Rosch (26) bemerkte in ihren Untersuchungen, daß manche Mitglieder von Kategorien als typischer angesehen werden als andere. Es existieren demnach Prototypen für Kategorien. Diese Prototypen haben viele Attribute gemeinsam, teilen aber nur wenige Eigenschaften mit Mitgliedern anderer Kategorien, während atypische Objekte genau umgekehrt charakterisiert werden können. Viele Menschen assoziieren mit einer Kategorie deren typischstes Mitglied, d.h. verknüpfen also eine konkrete Vorstellung mit einer Kategorie. Objekte werden demnach hinsichtlich ihrer potentiellen Zugehörigkeit zu einer Kategorie überprüft, indem sie mit dem jeweiligen Prototyp einer Kategorie verglichen werden. Es wird somit zumeist eher auf ein individuelles Konzept(27) zugegriffen als auf ein abstraktes, eine für den Menschen insgesamt typische Vorgehensweise.

Kategorien sind nach Auffassung der Kognitionspsychologie hierarchisch und klassenförmig organisiert. Man unterscheidet hier zwischen globalen, basalen und spezifischen Kategorien, wobei der basalen Ebene der größte Informationswert zukommt. Hier können die meisten Attribute assoziiert werden, da auf dieser Ebene die Prototypen angenommen werden. Die Umwelt wird häufig durch basale Elemente klassifiziert. "Wir nehmen die Welt in Clustern oder Gruppen von Attributen wahr, die nicht zufällig verteilt sind" (28), oft dabei durch den Rückbezug auf individuelle Kategorien, die ein wesentliches Element der subjektiven Erfahrung darstellen.

Die Strukturierung von Wahrnehmungen und das Wiedererkennen von Objekten basiert demnach in hohem Maße auf der kognitiven Fähigkeit des Menschen, Kategorien bilden und miteinander vergleichen sowie auf dieser Basis neue Objekte erkennen zu können. Viele Kognitionspsychologen rkennen zu können. Viele Kognitionspsychologen gehen dabei von einem sukzessiven Merkmalsvergleich der als relevant begriffenen Attribute von Kategorien aus. Doch erscheint an diesem Punkt die Annahme der Gestaltpsychologie plausibler, nach der zunächst eine gestalthafte Wahrnehmung von Ähnlichkeiten erfolgt, die im zweiten Schritt erst durch einen sukzessiven Merkmalsvergleich der definierenden Attribute erhärtet wird. Nähme man lediglich den Vergleich der Merkmale von Kategorien an, stünde man vor der Schwierigkeit, eine unendliche Anzahl potentiell relevanter Kategorien überprüfen zu müssen, was selbst vom effizient arbeitenden Gehirn nicht in akzeptab-

Zeit realisiert werden könnte. Demnach scheint eine primäre, gestalthafte Wahrnehmung von ilienähnlichkeiten (29) die Basis eines darauffolgenden Vergleichsprozesses zu sein, um rhaupt die Mannigfaltigkeit der Umwelt erkennen und ordnen zu können.

er dem Gesichtspunkt einer potentiellen Simulierbarkeit der menschlichen Wirklichkeitserfas- g durch einen Computer erscheinen verschiedene Faktoren relevant. Wie oben deutlich wurde, chnet sich gerade das Alltagsverständnis und die Alltagskommunikation durch den Bezug auf scharfe" Kategorien aus, deren Verknüpfungen nicht nach formalen Regeln, sondern kontextab- gig erfolgen. Es handelt sich eher um Annäherungen an Kategorien als um die eindeutige rdnung von externen Phänomenen zu intern verankerten Kategorien, wobei individuelle Erfahrun- und Erlebnisse einen wichtigen Stellenwert bei diesen Annäherungsvorgängen einnehmen. Die in puterprogrammen verankerten klar abgegrenzten Strukturen wie auch die Notwendigkeit einer deutigen Determination der jeweils als relevant bewerteten Kategorie scheint der menschlichen klichkeitserfassung nicht zu entsprechen. Ebenso tritt als deutlicher Unterschied die sache zu Tage, daß Menschen oftmals konkrete Vorstellungen an eine Kategorie binden (30) und sensorische oder motorische Engramme sich erinnernd zurückgreifen, die als Basis fungieren die Einschätzung neuer Objekte oder Situationen. Die lediglich begrenzte Simulierbarkeit stellungsgebundener Kategorienbildung und -benutzung wird hier besonders deutlich, wenn man sensomotorische Komponente jeder Kategorie ebenso bedenkt wie die individualspezifische totypisierung.

z wesentlich erscheint auch die Annahme der Gestaltpsychologie, nach der ein sukzessiver kmalsvergleich von Kategorien und Realem nicht der Wahrnehmungsweise des Menschen entspricht. gestalthafte Erkennen und erst sekundäre Überprüfen wurde an vielen Beispielen demonstriert scheint für viele Problemlösungsprozesse, z.B. ad-hoc - Hypothesenbildung auf der Basis der imärwahrnehmung, typisch zu sein. Gestalthaftes Erkennen setzt jedoch die Existenz von stellungen ebenso sehr voraus wie die Möglichkeit, Erlebtes und Erfahrenes mit dem Konkreten mittelbar in Beziehung setzen zu können. Wenn auch die Annahmen der Gestaltpsychologie nur nig erforscht wurden, so gilt doch allgemein als akzeptiert, daß konfigurierte Strukturen ein rakteristikum menschlicher Wahrnehmung sind. Der sukzessive Merkmalsvergleich, wie er in puterprogrammen vorgenommen wird, entspricht erst auf der zweiten Stufe des Erkennens den läufen, die im menschlichen Gehirn bei der Erfassung der äußeren Wirklichkeit stattfinden.

3.2 Begriffsbildung

e Bildung von Begriffen bzw. das Lernen von Begriffen basiert auf dieser kategoriellen ruktur. Das Begriffslernen erfolgt - so viele Kognitionspsychologen(31)- durch Hypothesenbil- ngen, wobei erfolgreich scheinende Hypothesen solange weiterverfolgt werden, bis ein negatives sultat erfolgt. Man nimmt an, daß das Lernen von Begriffen nicht graduell, sondern diskret rläuft. Während des Prozesses der Hypothesenüberprüfung werden demnach teilweise ad hoc chtige Lösungen gefunden. Dabei stellt die Erinnerung an bereits geprüfte Hypothesen einen sentlichen Faktor zur Erleichterung des Begrifflernens dar.

undsätzlich lassen sich zwei Strategien zur Begriffsbildung unterscheiden:
- analytische Strategien, die eine Abstraktion vom Prototyp oder den Attributen vornehmen;
- nichtanalytische Strategien, die einen Vergleich mit einem speziellen, bekannten Beispiel implizieren.

e analytischen Strategien sind gekennzeichnet durch
- vorsichtiges Focussieren, bei dem eine systematische Überprüfung der Relevanz von Attributen für einen positiven Fall erfolgt,
- spekulatives Focussieren, das charakterisiert ist durch die Modifikation und die Überprüfung mehrerer Attribute eines identifizierten positiven Objekts,
- Durchmustern (32), d.h. ein sukzessives Überprüfen einer einzigen Hypothese.

ntersuchungen ergaben, daß die am häufigsten benutzte analytische Strategie das vorsichtige ocussieren ist, Versuchspersonen demnach eine Abstraktion von Kategorien durch Identifikation er relevanten Attribute oft praktizieren.

ie nichtanalytischen Strategien nehmen eine Zuordnung von Objekten zu Kategorien auf der Basis rer Erfahrungen vor. Durch den Vergleich mit bekannten Fällen können Objekte als zugehörig zu iner bestimmten Kategorie angenommen werden, d.h. die Begriffsüberprüfung und Neubildung fußt n diesen Fällen auf individuell Erlebtem.

Zumeist lassen sich analytische und nichtanalytische Strategien kaum scharf voneinander differenzieren; die Begriffsbildung stellt demnach häufig eine Mischung von Vorgehensweisen dar, wobei für regelhafte Beispiele eher die analytische Strategie von Vorteil ist, bei Alltagsproblemen sich jedoch der Vergleich mit Bekanntem als effektiver erweist. Das Erlernen von völlig neuen Begriffen und die Klassifikation atypischer Vertreter einer Kategorie werden ebenfalls eher auf der Basis nichtanalytischer Strategien vorgenommen, was deutlich macht, daß Objekte, die nicht durch präzise Zuordnungen determiniert sind, eher den Bezug auf konkrete, vorstellungsmäßige Vergleiche erfordern. Gerade für das Alltagswissen erweist sich die konkrete Erfahrung oftmals als erheblich nützlicher gegenüber einer abstrakten Integration eines Phänomens in eine Kategorie. Konkrete Erfahrungen und das gestalthafte Erfassen von Familienzugehörigkeiten sind damit für das Alltagswissen relevanter als die analytische Vorgehensweise.

Deutlich wird an diesem Punkt wiederum, daß in Computerprogrammen lediglich die analytische Form der Begriffsbildung realisiert werden kann. Computer verfügen nicht über Erfahrungen im Sinne menschlichen Erlebens und haben keine Möglichkeit, Analogien zu erfassen, die eine gestalthafte Wahrnehmung voraussetzen. Das Begriffslernen erfolgt in Programmen stets durch einen sequentiellen Vergleich von Attributen einer Kategorie, wobei analytische Strategien wie die oben aufgeführten hier Anwendung finden können. Die nichtanalytischen, auf Vorstellungen und konkreten Erfahrungen gründenden Strategien sind aus oben genannten Gründen nicht maschinell simulierbar.

Wichtig ist weiterhin bei der Begriffsbildung, die Relevanz von Attributen abschätzen zu können. Diese Einschätzung basiert wiederum eher auf den konkreten Erfahrungen als auf abstrakt vorgenommenen Wertzuweisungen. Die Tatsache, daß eine Kategorienbildung häufig über Prototypen erfolgt, setzt Vorstellungsvermögen voraus. Indem ein Mensch mit dem Prototyp einer Kategorie konkretes Erleben, mentale Bilder und episodisches Wissen verbindet, gewinnt er eine gestalthafte, ganzheitliche Vorstellung von diesem Prototyp. Begegnet er Objekten, deren Gestalt Analogien aufweist zu bereits bekannten Prototypen, erfolgt eine Kategorienzuweisung bereits auf dieser Basis der Ähnlichkeitswahrnehmung. Die Annahme Roschs (33), nach der die Kategorien die Struktur der Lebenswelt widerspiegeln, impliziert damit die assoziative Verknüpfung prototypischer, konkret erfahrener Mitglieder einer Kategorie mit abstrakten Beschreibungen derselben. Diese Koppelung stellt die Basis dar für den adäquaten Umgang des Menschen mit seiner Umwelt. Da aber ein Computer Prototypen von Kategorien lediglich als spezifische Konfigurationen von Attributen sieht und keine konkrete Erfahrung und Vorstellung gewinnen kann, sind lediglich analytische, in Alltagssituationen und nichtdefinierten Konstellationen höchst ineffiziente, Strategien implementierbar, die zu den bislang aufgetretenen Defiziten hinsichtlich eines maschinellen Verständnisses führen.

7.3.3 Sprache und Perzeption als Basis der Kategorienbildung

Das Sprachvermögen stellt die universalste kognitive Fähigkeit des Menschen dar; sie wird unabhängig von der jeweiligen Kultur von jedem heranwachsenden Individuum - mit Ausnahme hirngeschädigter Personen - erlernt. Wessels setzt den Spracherwerb gleich mit dem Lernen "des impliziten metaphysischen Systems, das von den Mitgliedern dieser Kultur akzeptiert wurde" (35). Hier wird deutlich, daß die konkrete Ausprägung von Sprache kulturspezifisch ist, sich also in den Bedeutungen von Wörtern und Sätzen die Auffassung einer jeweiligen Lebensform widerspiegelt. "Jede Sprache enthält Ausdrücke, die auf einen kosmischen Referenzbereich zielen, in dem die grundlegenden Positionen einer Alltagsphilosophie kristallisiert sind, in der das Denken eines Volkes, einer Kultur, einer Zivilisation, ja sogar einer ganzen Epoche enthalten ist." (36). So fehlen in manchen Kulturen ganze Begriffsdimensionen, die in anderen Kulturen einen relevanten Stellenwert einnehmen. Als Beispiel wird oft das Fehlen des Zeitbegriffs bei den Hopis angeführt oder die mannigfaltigen Bezeichnungsformen für Schnee bei den Eskimos. Die Determination des Sprachgebrauchs und der Wortbedeutungen durch den jeweiligen Lebenszusammenhang bewirkt, daß ein Individuum bereits durch das Erlernen von Sprache und von Bedeutungszuweisungen die spezifischen Werte des jeweiligen kulturellen Umfelds erwirbt. Damit einher geht die kulturspezifische Beeinflussung des Denkens, von Whorf (37) als "linguistischen Determinismus" bezeichnet. Die Wirklichkeitserfassung eines Individuums erfolgt demnach durch eine Aufgliederung der Umwelt entsprechend den Strukturen und Bedeutungszuweisungen, die durch die Sprache geprägt sind. Whorf (39) geht davon aus, daß die Sprache eine spezifische Form der Wirklichkeitserfassung impliziert, da sie die Kategorien vorgebe, nach denen eine Strukturierung der Welt erfolge. Die Sicht der Welt ist demnach von Kultur zu Kultur unterschiedlich entsprechend den differenten Sprachmustern, die für den jeweiligen Zusammenhang spezifisch sind.

Vorstellung einer Festlegung der Wirklichkeitserfassung durch die Sprache und eine damit ergehende Prägung des Denkens wurde von Rosch und anderen kritisiert. Rosch (40) ermittelte, beim Menschen universale Kategorien zu finden sind, die sprachunabhängig existieren. Man eine Übereinstimmung von Farbwahrnehmungen, die unabhängig von der jeweiligen kulturellen chlichen Determination existierten (41) und schloß auf dieser Basis, daß entgegen Whorf's hme die perzeptiven Kategorien die sprachlichen determinieren. Die Erkenntnis, daß das en von farblichen Kategorien beispielsweise durch die universelle Prägnanz fokaler Farben immt wird (42) führte zu einer Relativierung der Auffassung eines linguistischen Determinis- nach dem Sprache das ausschließliche Fundament für die Wahrnehmung und Aufgliederung der darstelle.

ärt werden konnte letztlich jedoch bislang nicht, welches Verhältnis zwischen Sprache und lichkeitserfassung existiert. Man kann wohl davon ausgehen, daß der Einfluß der Sprache auf Erfassung der Welt sehr groß ist und Menschen ihre Umwelt in weitem Umfang entsprechend den urspezifisch relevanten Kategorien wahrnehmen. Doch ist eine perzeptiv bedingte Kategorien- lung ebensowenig von der Hand zu weisen. Eine sprachunabhängige Zergliederung der Welt analog Wahrnehmungsstrukturen ist demnach ebenso charakteristisch. Inwieweit das perzeptive riminationsvermögen die Basis für die Bildung sprachlicher Kategorien darstellt, vermag enwärtig noch nicht ausreichend geklärt zu werden. Man kann demnach mit Wessels davon gehen, "daß die Kategorien, die wir bilden, neben den linguistischen auch nicht-linguistische erminanten haben" (43).

Erkenntnis, daß die kategoriale Erfassung der Welt nicht ausschließlich auf sprachlichen egorien basiert, sondern daß zudem kulturunabhängige, universale Perzeptionskategorien stieren, bietet wiederum einen Hinweis auf die Unterscheidung zwischen Mensch und Maschine. die Kategorienbildung nicht nur durch sprachliche Prozesse erfolgt, gewinnt die menschliche rnehmungsfähigkeit und die Existenz gattungsspezifischer perzeptiver Universalstrukturen eine ondere Bedeutung im Hinblick auf die Annahme, daß die Wirklichkeitserfassung eines Menschen ht durch einen Computer simuliert werden kann. Die Synthese von perzeptiver und sprachlicher egorienbildung setzt voraus, daß ein Computerprogramm neben verbalen Kategorien auch über die runde liegenden Wahrnehmungsmuster verfügt. Dies jedoch ist gemessen an bislang vorstellbaren rspektiven nicht möglich, da es sich um eine gattungstypische Form des strukturellen Erkennens delt. Die auf sprachlichen Repräsentationen basierende Kategorienbildung in Computern ist nach nicht gleichzusetzen mit der kategoriellen Zerlegung der Welt durch den Menschen, da ztere die Existenz eines sensomotorischen Systems voraussetzt, wie es bislang nur der Mensch . Daher kann ein Computersystem zwar klar abgegrenzte, durch spezifische Attribute charak- risierte Kategorien anwenden, doch entbehren diese immer des individuellen Bedeutungsgehalts der sensorischen wie motorischen Inhalte. Eine maschinelle Modellbildung über die menschli- e Kategorienbildung und -anwendung bleibt damit immer ein unvollständiges Abbild.

4 Das menschliche Gedächtnis

4.1 Die Repräsentation von Wissen

it langem herrscht innerhalb der Psychologie die Meinung vor, daß die Analyse des menschlichen dächtnisses Aufschluß über die Struktur der kognitiven Prozesse geben könne. Man differenziert ute grundsätzlich drei unterschiedliche Gedächtnisformen, das sensorische, das Kurzzeit- und s Langzeitgedächtnis. Vor allem die Struktur und Organisation des Langzeitgedächtnisses steht bei im Vordergrund des Interesses, da dieses quasi das gesamte Wissen eines Menschen über die lt beinhaltet.

e Informationen im Langzeitspeicher werden in vielen gängigen Konzeptionen aufgegliedert (44):

episodische (autobiographische) Informationen,
semantische (allgemeine) Informationen, die Begriffe und Bedeutungen über die Welt beinhalten.

lving (45) hebt hervor, daß die Differenzierung zwischen episodischem und semantischem Wissen cht in der strikten Trennung aufrechtzuerhalten ist; vielmehr zeichnet sich das menschliche dächtnis durch eine enge Vernetzung der unterschiedlichen Strukturen aus, so daß das eine nie llig losgelöst vom anderen gedacht werden kann. Während das episodische Wissen autobiographi- che Informationen in einem zeitlich-räumlichen Kontinuum umfaßt, stellt das semantische Wissen

alles Wissen über kognitive Vorgänge, über die Bedeutung von Sprache, Wörtern und Symbolen dar Episodisches Wissen umfaßt damit die Fülle an Erfahrungen eines Menschen, während das semanti sche Wissen auf die Klassifikation von Konzepten und die Erfassung von Wortbedeutungen zielt Dabei ist sowohl das episodische Wissen mit dem semantischen verknüpft, wie auch Schlußfolgerun gen und Regeln auf konkreten Erfahrungen basieren. "Das episodische geht gewissermaßen dann i das semantische Wissen über, ohne daß es eine genau definierte Schwelle oder auch nur ei Bewußtsein für diesen Übergang geben muß"(46).

Figge und Job schlagen eine andere Zweiteilung des Langzeitgedächtnisses vor: "nämlich zwische Wissensspeicher und Könnensspeicher, zwischen Konzepten und Fähigkeiten oder, wenn man so will zwischen deklarativen und prozeduralen Beständen"(48). Dabei wird mit dem Begriff des Gedächt nisses die Wissenssektion beschrieben, die eben alles Wissen über Tatsachen, Konzepte un Relationen zwischen diesen enthält. Die Zuordnung von Bedeutungen oder subjektiven Vorstellun gen scheint typisch zu sein für die Verankerung von Informationen im menschlichen Gedächtnis Untersuchungen ergaben, daß Informationen, die vorstellungs- oder bedeutungsmäßig miteinande verknüpft werden können, der Erinnerung leichter zugänglich sind als isolierte Fakten; ebens verbessert die Möglichkeit, sich eine bildliche Vorstellung über einen Gegenstand machen z können, das Erinnerungsvermögen erheblich.

Wesentlich für die Analyse des menschlichen Gedächtnisses ist dessen aktive Organisation. Piage (49) wies bereits darauf hin, daß sich das Gedächtnis im Zuge einer aktiven Aneignung de Wirklichkeit entwickelt. Im Gegensatz zu den Assoziationisten, die von passiven Gedächtniskon zepten ausgingen, hob Piaget die Fähigkeit des menschlichen Gedächtnisses hervor, aktiv Bezüg zwischen Wissenselementen herstellen und Ableitungen aus bekannten Fakten vornehmen zu können.

Auch Kintsch (50) weist darauf hin, daß die begrenzte Kapazität des menschlichen Gedächtnisse darauf schließen lasse, daß nur wenig Informationen direkt gespeichert werden und stattdesse viel Wissen inferiert werden muß. Eine ähnliche Auffassung vertritt Hoffmann (51), der davo ausgeht, daß das "Gedächtnis kein System der passiven Registrierung und Speicherung von aufge nommenen Informationen darstellt, sondern als essentielle Komponente in den Prozeß der Informa tionsverarbeitung unmittelbar einbezogen ist" (52). Die Gedächtnistätigkeit ist damit immer mi den kognitiven Funktionen unmittelbar verknüpft. So ergänzen Inferenzen das interne Abbild de objektiven Realität und gewährleisten die Verfügbarkeit ausreichender Informationen bei unter schiedlichen mentalen Prozessen. Lindsay weist in diesem Zusammenhang auf die enge Koppelung vo Gedächtnis und Problemlösungsprozeß hin, der sich in Analogien und Vergleichsprozessen zwische aktuellem Fall und früheren Erfahrungen offenbart."It is a mixture of logical reconstruction o what must have been experienced with fragmentary recollections of what was in fact experienced" (53). Ebenso dienen Transformationen der internen Repräsentationen von Wirklichkeitsausschnitte der Bewältigung verschiedenster Probleme, wie auch die modifizierte Rekonstruktion von Erinne rungen notwendig ist für die Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt.

Die menschliche Kognition basiert im Wesentlichen auf dem Wissen, das ein Mensch im Verlau seines Lebens erworben hat. Wie oben bereits erwähnt, unterscheidet man häufig zwei Formen vo Wissen: das semantische und das episodische Wissen. Ein großer Teil des menschlichen Wissen wird im Gedächtnis in Form symbolischer Repräsentationen verankert. Die Kognitionspsychologi zielt in besonderem Maße darauf, die spezifischen Strukturen dieser Repräsentationen herauszu finden und die gedächnisinterne Organisation von Wissen, hier vor allem des semantische Wissens(55) zu identifizieren. Verschiedene Ansätze wurden hierzu entwickelt, von denen einig im Folgenden vorgestellt werden.

7.4.2 Modelle über das semantische Gedächtnis

Eines der wichtigsten Modelle ist das von Collins und Quillian(57) entworfene Konzept de hierarchischen Netzwerks, in dem das semantische Wissen durch eine Netzstruktur miteinande verbundener Begriffen abgebildet wird. Die Repräsentation des Wissens ist hier hierarchisc strukturiert, jede Eigenschaft von Objekten wird auf der höchstmöglichen Ebene repräsentiert Die Vernetzung der Begriffe ist hochorganisiert und basiert auf der Annahme einer eindeutigen d.h. prädikatenlogisch formalisierbaren Beziehung zwischen den Objekten. Die Verbindunge zwischen den Objekten stellen hier Wege für Suchprozeduren im Gedächtnis dar, der Informations abruf erfolgt demnach entlang der Knoten und Wege, wenn beispielsweise die Eigenschaft eine Objekts erfragt wird. Collins und Quillian nahmen an, daß für den Informationsabruf ein bestimmte Zeit notwendig sei, man also anhand der real benötigten Zeit für die Beantwortung vo unterschiedlichen Fragen die Gültigkeit des Modells überprüfen könne. Es erwies sich jedoch, da

Typizität der Eigenschaften von Objektklassen für die Reaktionszeit entscheidender ist als Lokalisation innerhalb einer Hierarchie. Die Nichtberücksichtigung der Relevanz der Typizi- stellt eine der hauptsächlichen Schwächen dieses Modells dar. Ebenso widerspricht die zise, logische Repräsentationsform der Tatsache, "daß semantische Begriffe eine interne uktur aufweisen und darin nonlinguistischen Begriffe vergleichbar sind" (58). Die fließenden nzen, die für semantische Begriffe charakteristisch sind, bleiben ebenso unberücksichtigt wie bedeutungsmäßige und erfahrungsabhängige Assoziation von Objekten, die ihre Basis in kreten Beispielfällen hat. Die hierarchische Strukturierung der Eigenschaftszuweisung ist r ökonomisch und wird erklärbar durch die von den Autoren vorgenommene Übertragung des lells auf einen Computer, doch widerspricht sie der lebensgeschichtlich bedingten, individuel- Verknüpfung von Objekten und Eigenschaften, die eine erfahrungsabhängige Verankerung von ten impliziert. "Wenn Informationen in einem Computer repräsentiert werden, dann ist es isch und auch ökonomisch, jede Eigenschaft ausschließlich auf dem höchstmöglichen Niveau zuzugeben, um dadurch Speicherplatz zu sparen; es ist jedoch keineswegs so sicher, daß das ssen von Menschen auch tatsächlich in einer perfekt logischen und effizienten Weise repräsen- ert ist" (59). Zusätzlich werden in diesem Konzept weder Aktionsschemata(60) noch das subjek- ve Bedeutungsumfeld eines Wortes und die kontextuellen Zusammenhänge berücksichtigt, so daß es cht ausreicht zur Explikation der Verankerung semantischen Wissens im menschlichen Gedächtnis.

n weiteres, von Collins und Loftus 1975 entwickeltes Konzept wird bezeichnet als "Modell der ch ausbreitenden Aktivierung". Dieses Netzwerk ist strukturiert durch semantische Relationen l semantische Entfernungen. Man versucht, die bedeutungsmäßige Nähe von Begrifffen zu erfas- n, indem die Länge einer Verbindung als Maßstab für die Nachbarschaft einer Relation gilt. uster von Begriffsrelationen entsprechen den bedeutungsmäßigen Assoziationen von Objekten, bei die Relation der Begriffe untereinander empirisch bedingt ist. Die Häufigkeit real attfindender Verknüpfungen wird so markiert und entsprechend der jeweiligen Stärke einer mantischen Beziehung unterschieden. Dabei gehen die Autoren von der Annahme einer sich sbreitenden Aktivierung aus. Wird ein spezieller Begriff im Gedächtnis aktiviert - etwa als aktion auf eine Frage - erfolge die gleichzeitige Aktivierung der benachbarten, d.h. bedeu- ngsverwandten Begriffe, wobei deren Stärke abnähme, je mehr Zeit vergangen ist und je weiter tfernt die Begriffe vom Ursprungsbegriff liegen. Während eines solchen Prozesses finde eine nschätzung der Relevanz von Verknüpfungen bezüglich der aktuellen Problematik und ein Abwägen r Bedeutsamkeit von semantisch benachbarten Objekten statt.

genüber dem hierarchischen Netzwerk bietet das Modell der sich ausbreitenden Aktivierung den rteil, daß bedeutungsmäßige, auf Erfahrungen basierende Relationen zwischen Objekten berück- chtigt werden und die Stärke von Verbindungen gemessen an ihrer Nützlichkeit ebenso verankert t wie die Typizität der Begriffe. Die Verknüpfungen von Objekten markieren in diesen Modellen s Bedeutungsumfeld eines Begriffs. "Netzwerkmodelle unterstellen..., daß die Bedeutung eines rtes in hohem Maße von den Beziehungen zwischen diesem Wort und unzähligen anderen Wörtern im dächtnis, mit denen es verknüpft ist, abhängt" (61). Dennoch weist auch dieses Konzept Grenzen uf, da es lediglich einfache Relation zwischen Begriffen beinhaltet und in seiner internen truktur als zu starr erscheint. Ebenso ist die Absenz von verankerten Ereignisfolgen und tionsabläufen zu bemängeln.

n drittes Modell zur Repräsentation von semantischem Wissen ist das Modell des Merkmalver- leichs. Im Gegensatz zu den Netzwerkmodellen, die davon ausgehen, daß der größte Teil des issens im menschlichen Gedächtnis verankert ist, wird mit diesem Konzept die Auffassung rtreten, daß das meiste Wissen ständig neu gebildet wird. Die Überprüfung von Aussagen erfolgt mnach nicht durch die Analyse von Objektverknüpfungen, sondern durch Merkmalsvergleiche wischen betroffenen Objekten. Wörter werden hier als Bündel von Merkmalen oder Attributen griffen (62). Man differenziert zwischen definierenden und charakteristischen Merkmalen, d.h. ntralen und weniger zentralen Eigenschaften von Objekten und bestärkt damit die Ansicht, daß timuli als Ensembles von Attributen codiert werden. Um die Beziehung von Begriffen zueinander lären zu können, wurde ein sogenannter semantischer Raum entwickelt, in dem Begriffe in nterschiedlichen Distanzen, je nach Assoziationsgrad, angeordnet wurden. Damit ist eine lusterbildung von Begriffen gemäß ihres bedeutungsmäßigen Zusammenhangs möglich. Die Entschei- ung, ob zwei Nomina der gleichen Kategorie angehören, basiert auf dem Vergleich der definitori- chen und der charakteristischen Merkmale, wobei die definitorischen Merkmale für alle Mitglie- er einer Kategorie eher übereinstimmen als die charakteristischen. Menschen nehmen einen ergleich zwischen den Merkmalen von Begriffen "vermutlich in einer holistischen Weise" vor 63), sie bemerken demnach sehr schnell, manchmal unmittelbar Ähnlichkeiten zwischen Objekten, hne daß ein sukzessiver Merkmalsvergleich primär erfolgt. Diese Beschreibung korreliert mit der

Auffassung der Gestaltpsychologie, nach der Ähnlichkeiten von Objekten gestalthaft, d.h. unmittelbar und ganzheitlich wahrgenommen werden. Dieser holistische Vergleich ist möglich auf der Grundlage von Erfahrungen, die ad hoc Analogieschlüsse erlauben. Diese Annahmen sind jedoch im Konzept des Merkmalsvergleichs nicht enthalten, vielmehr geht man hier davon aus, daß ein sukzessiver Vergleich erfolgt, der die Zuordnung von Objekten bewirkt. Kritisch zu bewerten ist die Unterscheidung zwischen definitorischen und charakteristischen Merkmalen, die sich für Alltagsobjekte so eindeutig nicht aufrechterhalten läßt. Eher ist die Familienähnlichkeit (64) entscheidend für die Zuordnung von Objekten zu entsprechenden Kategorien. Ebenso müssen die Besonderheiten von Konzepten berücksichtigt werden, die sich üblicherweise durch eine spezifische Konfiguration von Einzelmerkmalen charakterisieren lassen. Diese Merkmale haben eine unterschiedliche Genese; sie resultieren zum Teil aus sensorischen oder motorischen Engrammen, die mit dem jeweiligen Konzept gekoppelt werden, zum Teil aus abstraktem Wissen über dieses Konzept und nicht zuletzt aus der konkret erlebten Erfahrung, die das generelle Konzept um individualspezifische Ausprägungen ergänzt. Das Erfassen eines Konzepts beinhaltet demnach nicht nur den Zugriff auf Einzelinformationen sondern ebensosehr das Wiederbeleben von damit verknüpften Erfahrungen, seien diese nun sensorischer und motorischer Art oder an subjektives Erleben gebunden. Erst die Synthese also schafft jene individualtypische Gestalt eines Konzeptes, auf dessen Basis die Ermittlung von Analogien erst möglich wird. So ist die Annahme einer ausschließlich auf Merkmalsvergleichen basierenden Einschätzung von Objekten sehr unwahrscheinlich. "Individuen verfügen wahrscheinlich über eine Vielzahl von Strategien zur Falsifikation von Sätzen, von denen der Merkmalsvergleich nur eine ist" (65). Besonders problematisch erscheint die Repräsentation von Bedeutungen durch Merkmalskombinationen; während Autoren wie Katz(66)davon ausgehen, daß Bedeutungen von Begriffen durch Merkmale angemessen beschrieben werden können, tritt beispielsweise Bar-Hillel (67) dieser Auffassung entgegen, indem er die Annahme in Frage stellt, nach der das menschliche Verstehen darauf basiere, einen Begriff in seine Einzelmerkmale zu zerlegen und die Bedeutung von Worten sich auf eine Summation von Attributen reduzieren lasse. Betrachtet man die Fülle an Fakten, die ein Mensch im Laufe seines Lebens als Wissen erwirbt, erscheint die Position plausibler, die dem unmittelbaren, gestalthaften Gesamteindruck den Stellenwert einer primären Orientierung zuspricht, die Fülle der Begriffe somit reduziert wird auf die Zahl der potentiell adäquaten Konzepte. Denkbar ist eine Synthese zwischen der merkmalsorientierten und der gestaltpsychologischen Auffassung insofern, als dem primären Gesamteindruck ein entsprechender Merkmalsvergleich zur Erhärtung der ersten Wahrnehmung folgen kann.

Die strittige Frage, ob Wissen im menschlichen Gedächtnis fest verankert (semantische Netzwerke) oder ob es vorwiegend neu gebildet wird (Merkmalstheorie), kann vom gegenwärtigen Stand der Forschung aus betrachtet nicht letztgültig beantwortet werden. Doch ist eher beides denkbar. "Das menschliche Wissen ist zu verschiedenartig und auch zu flexibel, um streng als entweder vorgespeichert oder neu gebildet kategorisiert zu werden." (68). Entscheidend für die übergreifende Fragestellung einer potentiellen Simulierbarkeit ist die Tatsache, daß es sich beim menschlichen Gedächtnis um eine aktive Struktur handelt, dessen Repräsentationen nicht nur ständig neu gebildet werden, sondern dessen Repräsentationsvernetzungen ständig variieren, entsprechend den neuen Bedeutungszuweisungen, die sich aus der fluktuierenden Erfahrung und dem mannigfaltigen Erleben des Menschen ergeben. Eine deterministisch vernetzte Gedächtnisstruktur, wie sie bislang noch für alle Computersysteme insofern typisch zu sein scheint, als Umverlagerungen der semantischen Beziehungen durch die Systeme selbst nicht vollzogen werden können und auch das Begriffslernen nur in sehr rudimentärer Form möglich ist (69), kann nicht als adäquates Modell für das menschliche Gedächtnis begriffen werden, geschweige denn auch nur annähernd über dessen Leistungsfähigkeit verfügen. Zudem vermag keines dieser Modelle der Tatsache Rechnung tragen, daß das menschliche Gedächtnis unmittelbar gekoppelt ist an den sensomotorischen Apparat des Menschen, an dessen sinnliche Wahrnehmung und seine Fähigkeit zur Interaktion mit seiner Umwelt. "Daß das Gedächtnis ein Weltbildapparat ist, der sich aus unterschiedlichen Quellen speist, und daß das Gedächtnis auch zur Steuerung von Eingriffen in die Umwelt dient und dabei auf unterschiedliche Effektoren wirkt, bedingt eine Kompositheit seiner Elemente" (70).

7.4.3 Aktives strukturales Netzwerk

Ein weitergehendes Modell über die Struktur des menschlichen Gedächtnisses wurde von Norman und Rumelhard (71) entwickelt. Sie entwarfen eine netzwerkartige Struktur, als "active structural networks" (72) bezeichnet, mit der die Berücksichtigung sensorischer, erfahrungsmäßiger und emotionaler Informationen ebenso realisiert werden sollte wie die des linguistischen und kognitiven Wissens. Darüberhinaus intendierten sie mit ihrem Modell die Konzeption einer

lemübergreifenden Repräsentationsstruktur.
l aktive strukturale Netzwerk stellt ein semantisches Netzwerk mit Schemata dar. Jeder tion und jedem Satz ist eine zugrundeliegende konzeptuelle Struktur zugeordnet, die die tierenden Zusammenhänge zwischen Objekten offenbart. "A large set of conceptual frameworks chemata is required to organize and interpret the information" (73). Die einem Satz oder r Tatsache zugrundeliegende Bedeutungsstruktur wird hier als fundamental für die Wissensorsation und die Aneignung neuen Wissens angesehen. Verständnis erscheint als die Fähigkeit, ehungen zwischen Tatsachen zu begreifen und neue Fakten auf grundlegende Konzepte zurückführ zu können. Versteht ein Mensch eine Situation oder begreift er eine Tatsache, wäre dies ach gleichzusetzen mit dem Vermögen, neue Fakten in bereits bestehende kohäsive Strukturen ntegrieren, weil er diese als gleich hinsichtlich ihrer konzeptuellen Struktur begriffen

an und Rumelhart (74) gehen von zwei verschiedenen Repräsentationsformen der Wissensspeiche- im menschlichen Gedächtnis aus: von einem propositionalen System, in dem Konzepte oder iffe als Statements ausgedrückt sind, die über das konzeptuelle Verhältnis zwischen den elnen Mitgliedern einer Proposition Aufschluß geben, und von einer analogen Repräsentationsktur, die ein genaues Bild der originalen Szene beinhaltet und als mentales Szenario hrieben wird. Hypostasiert wird eine Anwendung beider Strukturen gemäß der jeweiligen abe, die es zu absolvieren gilt. "We suspect that people are capable of using different s of representation of their information stored within their memory, and that they are ble of either retrieving an appropriate form or of transforming the information stored into ever format is most appropriate for answering the questions put to them." (75). So können spielsweise die Operationen auf der Basis mentaler Bilder den Operationen, die auf Wahrnehgen folgen, homomorph sein. Dabei werfen Norman und Rumelhart die Frage auf, ob die analogen rmationen ebenso in propositionalen Systemen repräsentiert werden wie die linguistischen, ei sie einen gegenüber dem realen Szenario sehen, die bei nahezu allen Menschen zu finden d. Sie verkennen damit jedoch die Besonderheit eines mentalen Abbilds bzw. einer Vorstellung, sich ja gerade durch die bedeutungsvolle, subjektspezifische Verzerrung und Abstrahierung Wirklichkeitsausschnitten kennzeichnen lassen. Wie zudem die Darstellung der neurophysiolochen Grundlagen des Bewußtseins verdeutlichte, stellen analoge Repräsentationen einen ntaren Bestandteil vieler gedanklicher Prozesse dar und lassen sich von Konzepten auch auf rologischer Ebene abgrenzen. Figge und Job(76) weisen darauf hin, daß die Annahme einer schließlich propositionalen Strukturierung des Gedächtnisses dessen sprachliche Manifestation liziere. "Dieser Annahme steht aber die Tatsache entgegen, daß das Gedächtnis phylogenetisch ehen wesentlich älter als die menschliche Sprache ist". Sie führen an, daß das Gedächtnis ohl auf sensorische als auch motorische Differenzierungen hin orientiert sei und sich daraus ne besondere Struktur erst erklären lasse.

gesamt findet auch im aktiv strukturierten Netzwerkmodell von Norman und Rumelhart(77) trotz Berücksichtigung analoger Repräsentationen diese gattungstypische Besonderheit des menschln Gedächtnisses zu wenig Betonung. Obwohl dieses Konzept gegenüber den zuvor erläuterten eine entliche Erweiterung darstellt, ist doch die bedeutungsmäßige Vernetzung episodischer, somotorischer und emotionaler Erfahrung mit den einzelnen Konzepten nicht hinreichend chtet worden.

.4 Das Propositionale Wissen

le theoretische Konzepte über die Repräsentation von Wissen im menschlichen Gedächtnis ieren auf der oben bereits erwähnten Annahme, daß Propositionen dessen zugrundeliegende uktur bilden. Eine Proposition wird von Wessels bezeichnet als "eine symbolische Repräsentan, die eine Beziehung zwischen zwei oder mehr Begriffen ausdrückt und wahr oder falsch sein n" (78). Die propositionale Struktur basiert auf der prädikatenlogischen Formalisierung, z.B. d der Satz "Eine Frau ißt Kuchen" propositional repräsentiert durch *Essen (Frau, Kuchen)*. le Psychologen gehen davon aus, daß das menschliche Alltagswissen in propositionalen Repräntationen abgebildet wird. So sei beispielsweise ein Text abbildbar durch linear verknüpfte positionen. Die lineare Verbindung wird hier als äquivalent zur Bedeutungsstruktur angesehen. s impliziert zudem, daß die in Propositionen enthaltenen Wörter sich dann gegenseitig luzieren, wenn sie in der Bedeutungsstruktur eng zusammenliegen. Versuchsanordnungen ergaben e Bestätigung dieser Annahme, da Wörter eher behalten wurden, die in ihrer Bedeutungstruktur sprechend obiger Annahme zusammenhingen. Man geht davon aus, daß Menschen beim Lesen von ten und in Alltagssituationen propositionale Repräsentationen bilden und verwenden.

Anderson und Bower (79) entwickelten ein entsprechendes Modell, HAM, dessen grundlegende Wissenseinheit Propositionen darstellten. Fünf Formen von Assoziationen wurden aufgeführt, die propositional repräsentiert werden:

- Kontext - Ereignis
- Ort - Zeit
- Subjekt - Prädikat
- Relation - Objekt
- Begriff - Beispiel.

Repräsentiert in einer Baumstruktur mit hierarchisch verknüpften Assoziationen sollen diese Propositionen die Bedeutungsstruktur eines Textes abbilden. Das Modell HAM erlaubt eine Differenzierung von Typen, verstanden als allgemeiner Begriff, und Zeichen, d.h. konkrete Beispiele. Es existieren demnach separate Propositionen für ein spezielles Beispiel und für den allgemeinen Begriff. Damit werden Fehlschlüsse im Sinne unzulässiger Verallgemeinerungen vermieden, da konkrete Fälle nicht unmittelbar mit abstrakten Begriffen zusammenhängen.

Dieses Konzept impliziert die Annahme, daß alles Wissen von Menschen durch propositionale Bäume repräsentiert ist. "Diese Fähigkeit der Repräsentation differenter Arten von Informationen ist schon allein wegen der Varietät des Alltagswissens notwendig" (80). Propositionale Bäume können die Bedeutung von ganzen Satzkomplexen beinhalten und damit eine umfassende Bedeutungsstruktur oder einen spezifischen Kontext repräsentieren. Vergleichs- und Interpretationprozeduren erfolgen, indem ein propositionaler Baum gebildet wird, der dem aktuellen Satzgefüge entspricht. Im Gedächtnis wird nun eine vergleichbare Propositionalstruktur gesucht, mit der eine Bedeutungszuweisung zum aktuellen Satz erfolgen kann. Verstehen basiert auch diesem Konzept nach wieder auf einer Vergleichsprozedur, wenn auch die zu vergleichende Struktur ungleich komplexer gestaltet ist als beispielsweise die Merkmalslisten. Wird ein entsprechender propositionaler Baum nicht gefunden, kann der aktuelle Satz nicht in seiner Bedeutung erfaßt werden.

Das HAM-Konzept wurde durch ein entsprechendes Computermodell überprüft und aufgrund korrekter Resultate des Programms für gültig erklärt. Die Überprüfung von Probanden, die sich Wörter innerhalb gleicher Propositionen erheblich besser merkten als Wörter, die in unterschiedlichen Propositionen verankert waren, wurde als weitere Bestätigung betrachtet für die Auffassung, daß die mentale Repräsentation der Wirklichkeit auf Propositionen basiere, diese damit Basis von vielen kognitiven Aktivitäten seien. Wenn auch Propositionen eine adäquate Struktur darstellen für linguistisches Wissen im menschlichen Gedächtnis, so läßt der Stand der Forschung es dennoch nicht zu, dieses Modell als fundamentale Basis allen Wissens zu begreifen. Im Folgenden wird deutlich werden, daß beispielsweise visuelles Wissen anders repräsentiert wird, weshalb die bei manchen Forschern (81) angenommene Vorrangstellung der Propositionen relativiert werden muß.

7.4.5 Das räumliche Wissen

Die Mehrzahl der Psychologen geht heute davon aus, daß neben dem propositionalen Wissen auch räumliches Wissen und bildliche Vorstellungen im menschlichen Gedächtnis verankert sind. Untersuchungen zeigten, daß Menschen in sehr viel höherem Maße dazu in der Lage sind, Bilder zu behalten als dies für das Merken von Wörtern gilt. Visuelle Vorstellungen werden als entscheidend begriffen für Alltagshandlungen, da Menschen viele ihrer Erfahrungen als mentale Skizzen im Gedächtnis verankert haben. Die mentalen Vorstellungen entsprechen den realen Objekten in weitem Umfang. "Analoge Repräsentationen nennt man Objekte, die andere spiegelbildlich wiedergeben" (82). Doch konnte in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen werden, daß die analoge Repräsentation oftmals spezifische, für das betroffene Individuum bedeutungsvolle Verzerrungen beinhaltet, d.h. es sich in den seltensten Fällen um detailgetreue interne Wiederspiegelungen der äußeren Objekte handelt.

Untersuchungen zur Überprüfung der Existenz von analogen Repräsentationsstrukturen basierten auf zwei Annahmen:

1. daß die bildliche Vorstellung zahlreiche Merkmale der entsprechenden Objekte beinhalten müßte;
2. daß verschiedene Versuchspersonen ähnliche Perzeptionen von gleichen Objekten haben.

Die Ergebnisse offenbarten, daß mentale und perzipierte Vorstellungen sehr ähnlich sind und daß

Menschen mentale Rotationen und Verzerrungen dieser Vorstellungen möglich sind.
nimmt weiter an, daß mentale Bilder darüberhinaus auch durch propositionale Strukturen räsentiert werden, d.h. eine Abstraktion des realen Bildes stattfindet und entsprechende zepte gebildet werden. Dies offenbare sich durch die oft beobachtbare Unmöglichkeit, alle male vollständig beschreiben zu können, so daß der Mensch genötigt sei, auf sein propositio- repräsentiertes Alltagswissen zurückzugreifen, um bildliche Vorstellungen wieder aufzurufen. Kontroverse, ob alles menschliche Wissen propositional repräsentiert ist oder ob sowohl positionale als auch analoge Strukturen existieren, kann noch nicht letztgültig geklärt len. Doch bietet die phylogenetische Entwicklung des Gehirns(83) einen Hinweis darauf, daß orische und motorische Engramme in analoger Form verankert werden, propositionale Strukturen nach nicht alles Wissen eines Menschen repräsentieren.

it sind Vorstellungen als ein elementarer Bestandteil des Gedächtnisses zu betrachten, nkt man beispielsweise die Relevanz von Eindrücken für das kognitive Verhalten von Menschen. sind ja gerade diese primären Eindrücke eines Individuums, die es zu einer schnelleren ältigung von Lösungsmöglichkeiten befähigen. Für eine holistische Erfassung von Phänomenen die analoge Repräsentation von Objekten unabdingbar notwendig; ebenso ließe sich mit schließlich propositionalen Repräsentationen nicht erklären, warum Menschen über räumliche stellungen verfügen, ja überhaupt räumliches Vorstellungsvermögen besitzen und ad hoc nliche Zuordnungen vornehmen können. Mit Wessels kann so angenommen werden, "daß propositio- e und analoge Repräsentationen komplementär verwendet werden können und mentale Vorstellungen Basis für einige holistische Bearbeitungen bilden" (84). Analoge Repräsentationen scheinen ade für das Alltagsverständnis von zentraler Bedeutung zu sein, da sie einen Großteil des jektiven Erfahrungshorizontes darstellen und die Basis für Merkmalszuordnungen und Gesamtein- ätzungen bilden. Ebenso fußt die gestalthafte Wahrnehmung, d.h. das unmittelbare, ganzheitli- Erfassen von Objekten und Situationen auf der Möglichkeit, auf mentale Skizzen im Gedachtnis ückgreifen zu können, wobei dieser Zugriff oftmals unbewußt erfolgt. Die Reduktion analoger r holographischer Repräsentationen auf propositionale Strukturen sollte demnach mit Skepsis rachtet werden, scheint sie doch einer Verkennung der Besonderheit menschlichen Wissens ichzukommen und die Eigenart der Objektrepräsentationen im menschlichen Gedächtnis zu leugnen.

e Repräsentation von Wissen in Computersystemen, die eben diese analogen Repräsentationen ht beinhaltet, stößt demnach immer dort an Barrieren, wo Menschen sich ihrer Vorstellungs- ft bedienen und auf sensomotorische Engramme bei der Bewältigung von Umweltanforderungen ückgreifen. Wie später noch deutlicher zutage treten wird, findet diese Vernetzung propositi- len und analogen Wissens gerade in jenen Momenten besonders statt, die ein hohes Maß an ativität und schöpferischem Denkvermögen erfordern. Der Mangel an Vorstellungsvermögen sowie Unmöglichkeit, auf sensorische und motorische Gedächtniselemente zurückgreifen zu können, eint demnach ein wesentliches Indiz für die wahrnehmbaren Grenzen der 'Computerintelligenz' sein.

1.6 Alltagsgedächtnis

s oben Gesagte verdeutlich, warum insbesondere die Struktur des Alltagsgedächtnisses die -Forschung vor große Probleme stellt, da die Alltagserfahrung in besonderem Maße auf Vorstel- ngen, episodisch Erlebtem und vollzogenen Handlungen fußt. Die bislang entwickelten Konzepte r Repräsentation von Wissen reichen nicht hin, um diese elementare Form menschlichen Wissens ssen zu können.

nton(85) untersuchte in diesem Zusammenhang die spezifische Form, mit der Ereignisse im nschlichen Gedächtnis verankert werden. Dabei stellte sich eine wesentliche Beeinflussung des innerungsvermögens durch subjektiv-lebensgeschichtliche bzw. emotionale Faktoren heraus. sonders deutlich wurde dies durch die Identifikation sogenannter "highlights" im menschlichen dächtnis, d.h. subjektiv bedeutungsvollen Informationen, an die man sich schneller und äziser erinnern konnte als an andere, weniger bedeutsame Fakten. Dies entspricht der Tatsache, ß die in subjektiv wichtigen, zeitlichen oder situativen Umfeldern liegenden Situationen llig klar im Gedächtnis bleiben gegenüber den nur mühsam erinnerten anderen Situationen. "It as if the dark areas of memory have been illuminated by a search light with those things that cured near the illuminated areas readily visible, often in considerable detail" (86). Auffäl- g. ist die oftmals bemerkbare Unfähigkeit, zeitliche Zuordnungen von Ereignissen vornehmen zu nnen. So ist zwar die Erinnerung an Einzelereignisse vorhanden, jedoch keine Kenntnis über die

temporalen Verknüpfungen verfügbar. In Anlehnung an die Kognitionspsychologie geht Linton (87) von einer propositionalen Repräsentation von Ereignissen im Gedächtnis aus, wobei eine Vernetzung von Millionen derartiger Strukturen angenommen wird. Mit diesem Konzept kann jedoch nicht erklärt werden, warum manche Situationen als sogenannte "highlights" fungieren, d.h. in besonderer Weise subjektiv bedeutsam sind und damit auch besser rückerinnert werden können. Ebenfalls bleibt bislang unerklärt, warum ein singuläres Ereignis als sepzifisches gespeichert wird und welche Verbindungen zu anderen Ereignissen existieren. An diesem Punkt wird erneut offenbar, daß die Annahme einer propositionalen Struktur in all jenen Fällen zu begrenzt erscheint, in denen eine an Vorstellungen, sensorischen Wahrnehmungen und konkreten Handlungen gebundene subjektive Bedeutungszuweisung erfolgt. Dabei stellt sich unmittelbar die Frage, ob Ereignisse überhaupt als abstrakte Abläufe dargestellt werden können, da sie immer die interpretierende und bewertende Partizipation eines Subjekts voraussetzen.

Bisherige Konzepte zur Repräsentation von Alltagswissen im Gedächtnis, für die obiger Entwurf prototypisch stehen soll, scheinen dieses subjektspezifisch Bedeutsame nicht hinreichend zu berücksichtigen. Ebenso ist die Annahme reduktionistisch, nach der für die mentale Repräsentation von Ereignissen ausschließlich propositionale Strukturen angenommen werden, da sie auch skizzenhaft im Gedächtnis verankert sind und gekoppelt werden an die Fülle des konkret Erlebten.

Norman und Rumelhart (88) weisen darauf hin, welch elementare Bedeutung das Alltagsverständnis für die Interpretation von Sätzen und Eindrücken hat. "External knowledge about the world imposes constraints on the possible interpretations of information retrieved from memory" (89). Jede Repräsentationsstruktur beinhaltet Aspekte dieses Wissens über die Welt, läßt sich also nicht reduzieren auf die einfache, genaue Abbildung des jeweils zu repräsentierenden Objekts: "The memory representation is not simply an accurate rendition of real life, but in fact, is a combination of information, inference and reconstruction from knowledge about buildings (=Spezialwissen) and the world in general" (90). So ergaben zahlreiche Untersuchungen, daß viele Wahrnehmungen und die sich daran knüpfenden Repräsentationen eher eine Rekonstruktion darstellten, die auf der Bedeutung der Objekte und ihrer speziellen Funktionen basierten, als daß sie direkte, natürliche Abbilder der Objekte darstellten. So sind im menschlichen Gedächtnis modifizierte, durch den subjektiven Bedeutungszusammenhang geprägte mentale Bilder verankert, die nur noch annähernd den ursprünglichen Perzepten und den realen Szenarios gleichen. Begreift man entsprechend Begriffe als ein "sensorimotor image of our experiences" (91), wird deutlich, wie sehr das subjektive Bedeutungsumfeld eines Menschen die Art beeinflußt, in der er Repräsentationen der Wirklichkeit in seinem Gedächtnis vornimmt. Die Annahme, für jedes Objekt existiere eine eindeutige mentale Repräsentation, muß verworfen werden angesichts der direkten Koppelung der sensomotorischen Erfahrungen mit der Begriffsbildung einerseits und der individuell vorgenommenen Modifikation der Wirklichkeitseindrücke, die zu subjektspezifischen Repräsentationen der Realität führen.
Ein weiteres, später noch ausführlicher dargestelltes Charakteristikum von Alltagswissen ist die Verankerung von prozessuralem Wissen, das von großer Relevanz für die Bewältigung von Alltagsproblemen ist. Dieses Wissen umfaßt die mentale Simulation realer Abläufe, etwa planender Vorgänge, die mit spezifischen Ereignissen derart gekoppelt sind, daß analoge Situationen den Rückgriff auf die entsprechenden Erfahrungen unmittelbar zulassen.

Diese Besonderheiten des Alltagsverständnisses machen deutlich, warum innerhalb der KI-Forschung bislang immer dann Programme an ihre Grenzen stießen, wenn ein Rückgriff auf die alltägliche Erfahrung erforderlich war. Weder besitzt ein Computersystem episodisches Wissen, d.h. die Fülle an Erlebtem und Erfahrenem, auf die ein Mensch zurückgreifen kann, noch verfügt es über die vielfältigen Erinnerungen an konkret ausgeführte Handlungen, die ihm einen Rückbezug zu erfolgreich Absolviertem möglich machten. Während es aber theoretisch noch vorstellbar erscheint, eine gewisse Menge an Ereignissen und Handlungsabläufen in einem maschinellen Gedächtnis zu verankern, stellt die menschliche Vorstellungskraft einen Bereich dar, der mit den bisherigen Repräsentationsmodellen nicht simuliert werden kann. Die Relevanz der Vorstellung für den Umgang mit der äußeren Wirklichkeit wie auch die Entwicklung kreativer Ideen ist derart offenbar, daß das menschliche Gedächtnis ohne die Vorstellung nicht gedacht noch simuliert werden kann. Kognitive Prozesse, die über streng eingegrenzte Problemfelder hinausreichen - und das sind die meisten - bedürfen der Vorstellungskraft, wie sie für den Menschen typisch ist. Wollte man demnach Computer mit einem Gedächtnis ausstatten, das auch nur annähernd dem des Menschen ähnlich ist, bedürfte es zunächst der technischen Möglichkeit, Vorstellungen integrieren zu können, d.h. ein Computersystem mit einem sensomotorischen System zu verbinden, das ihm sinnliche Wahrnehmungen ebenso ermöglicht wie verändernde Eingriffe in seine Umwelt, um überhaupt erst jene Engramme bilden zu können, die dem menschlichen Gedächtnis seine charakteristische Struktur

eihen.
ikt man, wie sehr abstraktes und erlebtes Wissen bei allen kognitiven Vorgängen ineinander-
fen, so erscheint zumindest das Ansinnen einer maschinellen Theoriebildung über das mensch-
e Gedächtnis bedenklich, insbesondere dann, wenn die ermittelten Ergebnisse gleichgesetzt
en mit dem, was für den Menschen als typisch betrachtet wird.

Verstehen

Fähigkeit zu verstehen zählt zu den herausragenden kognitiven Leistungen des Menschen. Durch
Verständnisvermögen ist der Mensch dazu in der Lage, seine Umwelt zu begreifen und in
mikativen Situationen auf seine jeweiligen Partner einzugehen. Diese Kompetenz beinhaltet
allem das Verstehen von Sprache als wichtigstem Medium zwischenmenschlicher Kommunikation,
eht sich aber ebenso auf das allgemeine Verständnis von Welt, das als wesentliche Basis
r kognitiven Fähigkeiten gelten muß. Im Folgenden wird Bezug genommen auf das semantische,
matische und alltägliche Wissen eines Menschen, das ihm erst ermöglicht, verständig zu
ieren.

eift man Verstehen als "Vorgang der Festlegung von Bedeutungen" (92), so wird deutlich, daß
semantische Wissen elementar ist für das sprachliche Verständnis. Es impliziert vor allem
Fähigkeit zur Differenzierung zwischen dem wörtlichen Sinn eines Satzes und dessen intentio-
r Bedeutung, die eine Interpretation der Absicht eines Redenden voraussetzt. "Um einen Satz
ständig zu verstehen, muß man die wörtliche und die intendierte Bedeutung erfassen. Fehler
Verstehen treten dann auf, wenn man zwar die wörtliche Bedeutung erfaßt, nicht jedoch die
ndierte Bedeutung" (93).

Bedeutung semantischen Wissens für das Verständnis von Sprache ist grundsätzlicher Natur und
stritten. Es dient vor allem der Ermittlung kontextueller Bezüge, die eindeutige Zuordnungen
Bedeutungen ermöglichen. Ambiguitäten von Begriffen können vermieden werden, als der Kontext
ils Aufschluß über die konkrete Wortbedeutung gibt. Damit stellt der jeweilige Zusammenhang
Grundlage des Verständnisses von sprachlichen Äußerungen dar, wobei ein Kontext nie isoliert
achtet werden kann, sondern stets als eingebettet in übergeordnete Zusammenhänge, die
tlich ebenso entscheidend sind für den Sinngehalt von Sprache sind.

n dem semantischen Wissen sind Kenntnisse über die sozialen Regeln der Kommunikation, hier
pragmatisches Wissen bezeichnet, ebenso relevant für das Verstehen von Sprache. So vereinfa-
h kulturelle Übereinstimmungen und kommunikative Konventionen das Verständnis von sprach-
nen Akten und sind überdies Basis für die Erfassung intentionaler Bedeutungen. Hörmann (94)
t in der Intention die entscheidende Instanz für das Verstehen von Situationen. "Die
ention schaffe die Transparenz, die uns im Akt des Verstehens durch das Gesprochene hindurch
das Gemeinte blicken läßt" (95).

en dem kontextualen Bezug stellt damit die Intention, d.h. die Determination außersprachli-
r Ziele für das Verständnis von Sprache einen wesentlichen Faktor dar. Das Wissen über
bezogene Kommunikation und allgemeine menschliche Bedürfnisse erleichtert dem Menschen das
ständnis sprachlicher Äußerungen durch Rückbezug auf die dem sprachlichen Ausdruck immanente
ention. Kontextgebundenheit und Intentionalität(96) menschlicher Ausdrucksformen sind damit
is für den Umgang mit Mehrdeutigkeiten. "Diese Fähigkeit, das Spektrum möglicher Bedeutungen
verengen, indem wir alles, was außerhalb des Kontexts mehrdeutig wäre, außer acht lassen,
ne ich 'Ambiguitätstoleranz' " (97). Das Eingebundensein in bestimmte Lebenszusammenhänge
eits wirkt einengend auf die möglichen Wortbedeutungen; momentante Tätigkeiten begrenzen die
eutungsvielfalt, ermöglichen dem Menschen das Lernen und Begreifen von Worten und Sätzen. Die
sache, daß Menschen in eben diesen Lebenszusammenhängen aufwachsen und daß sich ihr Sprachge-
uch und ihr Sprachverständnis in der kontinuierlichen Interaktion mit verschiedenen Kontexten
wickelt, befähigt sie zum sprachlichen Verständnis. Diese Kompetenz kann ein Computer schon
halb nicht vorweisen, weil ihm Begriffe definitorisch eingegeben werden müssen, er sie also
ht in kontextuellen Zusammenhängen erfährt und anwendet. Gegen eine solche eindeutige
riffsdefinition wehrt sich beispielsweise Wittgenstein (98), indem er Begriffe in bestimmte
ensformen eingebettet sieht, die ihre Bedeutung und ihr Bedeutungsumfeld markieren. Durch
sen kontextuellen Bezug, der jedem Begriff innewohnt wie auch die menschliche Lebensform im
gemeinen, die sich in jedem Begriff niederschlägt, sind Begriffe in dem Sinne, wie Menschen
gebrauchen, nicht in Computerprogramme implementierbar.

Um Sprache zu verstehen, bedarf es weiter der Fähigkeit, auf Wissen im Gedächtnis zurückgreifen zu können, da nur so eine Differenzierung hinsichtlich neuer und vorhandener Informationen erfolgen kann. Nach Auffassung vieler Kognitionspsychologen erfolgt dies, indem im Gedächtnis nach passenden Propositionen für die jeweilige Information gesucht wird. Wird kein adäquates Wissen gefunden, findet eine Integration der neuen Information ins Gedächtnis durch Angliederung an existierende Propositionen statt. Bereits vorhandene Propositionen ermöglichen ein Informationsverständnis auf der Grundlage von Erfahrungen. Sind keine entsprechenden Propositionen im Gedächtnis zu finden, so erfolgen überbrückende Annahmen und Hypothesen, die ein Informationsverständnis durch die Bildung von Schlußfolgerungen ermöglichen. Neben dem Zugriff auf Propositionen ist die assoziative Koppelung von Vorstellungen mit Wörtern oder Satzgefügen ebenso wichtig für die Erfassung von Bedeutungen, da so vor allem der subjektspezifische Sinngehalt von Aussagen in die Bedeutungszuweisung einfließt. Verstehen basiert demnach nicht nur auf der Anwendung semantischen Wissens, sondern zudem auf der Fähigkeit, bereits vorhandenes Wissen heranzuziehen und Schlußfolgerungen über neue Informationen zu vollziehen. Damit wird die Bedeutung des Alltagswissens für das Verständnis von Sprache offenbar.

Der alltägliche Sprachgebrauch setzt die Fähigkeit voraus, sich informativ und nicht-trivial auszudrücken. Dies bewirkt, daß viele Informationen nicht explizit geäußert werden sondern zwischen den Zeilen versteckt sind und durch Schlußfolgerungen erst verstanden werden können. Die Basis dieser Schlußfolgerungen ist das Alltagswissen, das erst die entsprechenden konzeptuellen Erwartungen ermöglicht. Die Kognitionspsychologie nimmt eine schematische Gliederung dieses Alltagswissens an. Diese Schemata entsprechen im Groben den Repräsentationsstrukturen, die innerhalb der KI-Forschung entwickelt wurden, d.h. den "Frames"(100), "Scripts" (101) und "Deskriptionen" (102). Ein derartiges Schema enthält sowohl Kategorien, die üblicherweise mit bestimmten Abläufen oder Ereignissen zusammenhängen, wie auch Variablen, die sich episodenhaft verändern (spezifische Ereignisse). Hat nun eine Person in einer bestimmten Situation nicht alle verfügbaren Informationen explizit zur Verfügung, kann sie auf der Basis dieser Schemata Schlußfolgerungen über die typischerweise stattfindenden Abläufe ziehen, um diese verstehen zu können. Durch dieses fiktive Wissen, das aus den konkreten Erlebnissen in analogen Situationen resultiert, ist demnach Verständnis möglich, ohne daß alle Informationen direkt dargestellt werden. Gleiches gilt für die mentalen Skizzen, die im Gedächtnis jedes Menschen verankert sind und die Analogieschlüsse spontan ermöglichen, wenn sich vergleichbare Assoziationen etwa beim Lesen eines Textes einstellen.

Verstehen wird innerhalb der Kognitionspsychologie jedoch vorwiegend gleichgesetzt mit der Bildung von Schemata, die durch die Zuordnung inferierter und existierender Merkmale entstehen. Der Prozeß, einen Text zu verstehen, entspräche damit der Suche nach einem geeigneten Schema, dessen Merkmale verglichen werden mit den im Text auftretenden Werten. Die Aktivierung der entsprechenden Schemata erfolgt dieser Auffassung entsprechend durch das Auftreten typischer Wörter oder durch Kontextinformationen. Untersuchungen, die in der Kognitionspsychologie zur Erhärtung dieser Annahme durchgeführt wurden, ergaben, daß Probanden dann einen Text rasch verstanden, wenn sie Schemata anwenden konnten. Diese Ergebnisse weisen zwar darauf hin, daß Menschen Situationsvergleiche vornehmen, um bestimmte Ereigniskonstellationen zu begreifen, doch ist deshalb noch lange nicht erwiesen, daß diese Vergleiche ausschließlich auf Schemata basieren. Vielmehr kann es sich auch um Vorstellungen bzw. mentale Skizzen handeln, die eine sofortige Einordnung von Situationsbeschreibungen ermöglichen oder, um in der Terminologie der Gestaltpsychologie zu bleiben, um gestalthafte Assoziationen mit Ereignissen, die als Ganzes, als holographisches Gefüge im Gedächtnis verankert sind. Damit wäre der von der Kognitionspsychologie angenommene Merkmalsvergleich und die Substitution unbekannter Werte durch Schlußfolgerungen nicht von Bedeutung für das primäre Verständnis einer beschriebenden Konstellation, sondern kämen möglicherweise erst zum Tragen, wenn singuläre Fakten erfragt werden, die überbrückende Schlußfolgerungen voraussetzen. Die Verankerung gestalthafter Objektvernetzungen im Gedächtnis ermöglicht damit ebensosehr wie die Schemata, in denen episodisches Wissen neben semantischem repräsentiert ist, die konzeptuell gesteuerte Verarbeitung, die für das Verstehen von grundlegender Bedeutung ist.

Die Fähigkeit zu verstehen bildet die Basis aller Kommunikationsprozesse. Norman und Rumelhart (103) weisen auf die Notwendigkeit hin zu gewährleisten, daß Kommunikationspartner über gleiche Konzepte reden, d.h. auf gleiche Repräsentationen in ihrem Gedächtnis zugreifen, wenn sie über einen spezifischen Gegenstand reden. Da jedoch, wie bei der Darstellung des Alltagsgedächtnisses schon deutlich wurde, jeder Mensch subjektspezifische Verzerrungen der Realität bei der mentalen Repräsentation von Wirklichkeit vornimmt, ist die vollständige Überlappung der Konzepte von unterschiedlichen Kommunikationspartnern eher selten. "The concepts within one person's mind are

ost certainly different from the concepts in everyone else's" (104). Die menschliche Sprache nhaltet verschiedene Konventionen, die ein Verstehen trotz dieser Divergenzen möglich macht. textuelle Bezüge, die implizite oder explizite Offenbarung von Intentionen, der wahrnehmbare salzusammenhang sowie fallbezogene Informationen wie auch letztlich der gemeinsame kulturelle text ermöglichen Verständnis trotz individuell differenter Repräsentationen. Dabei stellt ser gemeinsame Hintergrund, nämlich der soziale und kulturelle Kontext, das elementare dament aller Verstehens- und Verständigungsprozesse dar und offenbart damit eine grundlegende riere maschineller Bedeutungserfassung. Wollte man eine dem Menschen äquivalente Verständnis- igkeit in ein Computersystem integrieren, setzte dies eine Sozialisationsentwicklung voraus, sie für den Menschen typisch ist und während der in der konkreten Interaktion mit anderen schen und mit seiner Umwelt jene kulturspezifischen Engramme gebildet werden, welche die is umfassenden Verständnisses bilden.

iglich begrenzt auf das sprachliche Verstehen bleiben wesentliche Dimensionen des menschli- n Verständnisses unberücksichtigt, die jedoch auch für das Sprachverstehen von Belang sind. s wird deutlich, wenn man das Verstehen anders als vornehmlich operationalistisch auffaßt. So zt beispielsweise Hofstätter (105) Verstehen mit dem Prozeß gleich, "etwas in seinem wesens- igen Zusammenhang (zu) erkennen, innerlich nachvollziehen (nachleben) und dabei seinen ngehalt erfassen bzw. durch einen 'sinnverleihenden Akt' mit dem Ordnungs- und Wertgefüge der ebten Welt in Beziehung (zu) setzen". Damit impliziert Verstehen mannigfaltige Erfahrungen darauf basierende Bedeutungszuweisungen. Das primäre Erfassen als Grundlage des Verstehens gleichzusetzen mit dem unmittelbaren Erleben des Sinngehaltes. Dieses Erleben setzt jedoch aus, daß Ähnliches bereits erfahren wurde, Erleben sich also zusammenfügt aus aktuellem eben und erfahrungsbedingtem Rückerinnern an einstmalig Erlebtes. Der sinnverleihende Akt als druck des Verstehens vollzieht eben dies, nämlich die Integration des Neuerlebten in das glomerat bisheriger Erfahrungen und die sinngerechte Einordnung des Aktuellen in das eigene ssen als Grundlage verständiger Handlungen. Dieser Integrationsprozeß, der auch von der gnitionspsychologie als Basis des Verstehens begriffen wurde, ist jedoch nur in Folge der imären Sinnerfassung möglich und nicht zurückzuführen auf die bloße Suche nach passenden positionen im Gedächtnis. Verstehen ist ein schöpferischer gedanklicher Prozeß, der als Folge n äußeren Abläufen vom Individuum durch Rückbezug auf seine Erfahrungen vollzogen wird. Erst e gedankliche Leistung eines Menschen, der den an sich bedeutungsleeren Fakten einen beson- ren Sinn verleiht durch die Verknüpfung mit geistigen Akten und seinen spezifischen Erfahrun- n, schafft Verständnis.

jekte und Tatsachen sind damit nur erfahrbar durch den Rückbezug auf den situativen Kontext d auf die menschliche Praxis allgemein, die diesen Kontext schafft. "Wenn wir in der Welt imisch sind, dann sind die sinntragenden Gegenstände in den Bezugsrahmen eingebettet, in dem r leben. Sie sind nicht Modelle der Welt, die wir in unserem Geist oder Gehirn gespeichert ben. Sie sind die Welt selbst" (106). Dabei sind in die Objekte bereits die menschlichen fahrungen und Motive mit eingegeben, die menschliche Praxis ist den Objekten quasi immanent. r Mensch erfährt die Tatsachen und Objekte der Welt bereits als sinnvoll auf der Basis seiner wartungen und Erinnerungen, da er sie stets in einem situativen Kontext wahrnimmt. Die nahme, daß zunächst isolierte Tatsachen erkannt und ihnen dann ein Sinn verliehen wird, scheint nicht plausibel, ja verkennt, daß Wirklichkeit nie ohne das erkennende Subjekt gedacht rden kann.

greift man also das Verstehen nicht bloß operationalistisch als Basis für adäquate Handlungen z.B. die korrekte Beantwortung von Fragen)(107), sondern setzt Verstehen gleich mit einem nnverleihenden Akt, der durch ein Subjekt unter Rückgriff auf seine mannigfaltigen Erfahrungen id sein Erkennen von Intentionen vollzogen wird, dann werden die Grenzen deutlich für ein aschinelles Verständnis. Verstehen setzt ja eben das voraus, worüber Computersysteme nicht rfügen: die Fähigkeit zur Deutung von Situationen, wobei Deutung nicht gleichgesetzt wird mit iner kontextbezogenen Bedeutungszuweisung sondern begriffen wird als die Fähigkeit, die Fülle rworbenen Wissens und Erlebens im Umgang mit der Welt einzusetzen, um eine konkrete Situation verstehen. Dieses Erleben der Welt ist gebunden an die menschliche Existenz, die Körperlich- eit des Menschen und seinen spezifischen Umgang mit anderen Menschen und seiner jeweiligen mwelt. Maschinelles Verstehen ist somit nur insofern denkbar, als es instrumentalistisch ufgefaßt wird, d.h. ein Verständnis von Situationen beinhaltet, welches zwar korrekte Handlun- en ermöglicht, nicht jedoch die Erfassung des tieferen Sinns.

7.6 Problemlösung

7.6.1 Konzepte zur Problemloesung

Seit langem schon stellt die Analyse der Art, wie Menschen die unterschiedlichsten Probleme bewältigen, einen Schwerpunkt innerhalb der psychologischen Forschung dar. Vor allem in den letzten Jahren gewann diese Fragestellung besonderes Gewicht; das Problemlösungsverhalten, oder, wie es im angelsächsischen Sprachraum bezeichnet wird, das "problem solving" (108), zählt zu den wichtigsten Forschungsbereichen der Kognitionspsychologie, deren Resultate unmittelbaren Einfluß auf die Künstliche-Intelligenz-Forschung nahmen.

Die Kognitionspsychologie differenziert allgemein zwischen gut definierten und schlecht definierten Problemen. Sogenannte gut definierte Probleme zeichnen sich aus durch eine eindeutige Determination des Ausgangs- und des Zielzustandes, während bei schlecht definierten Problemen häufig eine offene Problemstruktur vorherrscht.

Generell unterscheidet man vier Stadien des Problemlösungsprozesses:

1. die Definition des Problems und die Markierung von Ausgangszustand und Ziel;
2. das Finden einer effizienten Strategie unter Berücksichtigung des Problemtyps, des Problemgebiets und der Erfolgswahrscheinlichkeit;
3. die Anwendung der Problemlösungsstrategie;
4. die Evaluation der Problemlösung, d.h. die Überprüfung der Güte und der Adäquatheit einer selektierten Strategie.

"Definition des Problems, Planung und Exekution der Strategie und Evaluierung des Prozesses 'stehen' während des gesamten Prozesses miteinander in enger Interaktion" (109).

Das Alltagswissen, das semantische Wissen und das Wissen über das jeweilige Fachgebiet stellen dabei die Basis dar für die Determination des Problemraums und die Selektion einer Strategie. Dabei erweisen sich Vorstellungen als ebenso entscheidend wie verbale bzw. propositionale Strukturen. Insbesondere das Alltagswissen, "das größtenteils auf unseren früheren Erfahrungen basiert" (110), ist universell relevant für eine korrekte Problemlösung.

Wesentlich für die Güte von Problemlösungsprozessen ist die mentale Strukturierung des Problemfeldes. Nach Auffassung der Gestaltpsychologie basiert die menschliche Kognition auf der aktiven Organisation von Fakten und Objekten in einem kohärenten Gesamtgefüge. Eine Problemlösung wäre damit zu vergleichen mit der "Strukturierung von Elementen eines Problems in einer holistischen Konfiguration, die eine Lösung des Problems aufzeigt" (111). Das Erfassen dieser problemspezifischen Konfiguration ist gleichzusetzen mit der tieferen Einsicht in die Struktur und das Wesen von Problemen, wie sie überwiegend als unabdingbar notwendig begriffen wird für eine korrekte Lösung. Die Umstrukturierung dieser Problemkonfiguration bzw. die Modifikation der Problemrepräsentation stellt einen ganz entscheidenden Faktor dar für die effiziente Problemlösung. Das, was in der Alltagssprache oft mit der Bezeichnung "blitzartiger Einfall" beschrieben wird, scheint dieser Umstrukturierung des Problemraums zu entsprechen. Ein Haftenbleiben an der ursprünglichen Repräsentation führt dazu, daß Lösungen, die ein hohes Maß an Flexibilität erfordern, nicht gefunden werden können. Weiter nimmt man an, daß Menschen zumeist über mehrere verschiedene Repräsentationen eines Problems verfügen, zwischen denen sie variieren können. Dies impliziert unterschiedliche Blickwinkel einer Sache und differente Deutungen der Relevanz von Objekten oder Ebenen, also Faktoren, die eine Fähigkeit zur Neugewichtung von Faktoren und zur flexiblen Modifikation von Konstellationen voraussetzen. Bereits hier wird deutlich, daß die menschliche Problemlösung nicht reduziert werden kann auf einen systematisch ablaufenden Denkprozeß, der nach formalen Regeln verläuft. Im Gegenteil scheint sich die flexible und damit uch intelligente Problemlösung dadurch auszuzeichnen, daß sie unterschiedliche Konfigurationen des Problemfeldes bildet, die Bedeutungs- und Relevanzzuweisung der Objekte modifiziert und eine kontinuierliche Interaktion zwischen Determination des Problemraums und Strategieselektion und -anwendung realisiert.

Wertheimer (112) hebt entsprechend das mechanische, sich in gewohnten Bahen bewegende Denken ab vom produktiven Denkprozeß, der eine Überschreitung des zuvor Festgelegten impliziert. Produktives Denken setzt Selbständigkeit und Einsicht voraus, d.h. es impliziert, daß der Problemlösende eigenständig eine Strategie zur Lösung findet und die problemspezifische Struktur erkennt. Dabei

t Wertheimer voraus, daß der Denkende versteht, warum ihn eine Strategie zur Lösung führte, also die Güte eines Weges abschätzen und ein Problem in seiner Besonderheit erfassen kann. Begriff, den ich von einer Sache habe, wird in solchem Prozeß oft nicht nur bereichert, lern verändert, verbessert, vertieft." (113) Produktive Problemlösung bedeutet damit eine enzung von Denkleistungen, die nach erlernten oder vorgegebenen Techniken vollzogen werden.

lwold begreift gar nur diejenigen Aufgaben als wirkliche Probleme, die eine eigenständige ungsfindung implizieren; "Ein Problem sei dann gegeben, wenn ein Individuum ein bestimmtes erreichen will, jedoch nicht weiß, wie es zu diesem Ziel gelangen kann, also nicht auf bekannte spezifische Verfahren, spezifische Techniken und Operationen zurückgreifen vermag." 5) Diese Auffassung setzt voraus, daß der Problemlösende über Einsicht in das Problem verfügt auf dieser Grundlage Strategien und Regeln beurteilen kann. Der intelligente Problemlösungs-zeß beinhaltet dabei Reorganisations- und Umstrukturierungsphasen, die zu neuen Synthesen ifizierten Sichtweisen eines gegebenen Problems führen. Durkin (116) unterscheidet hier schiedene Verhaltensweisen, die ineinanderwirkend den Problemlösungsprozeß charakterisieren:

ie trial-and-error - Phase,
ie Reorganisation des Problemfelds, das plötzliche oder wachsende Verständnis der roblemsituation (Aha-Erlebnis),
ie schrittweise Analyse (planende Suche),
nformungs- und Umstrukturierungsvorgänge (blitzartige Einfälle).

er (117) betont die Relevanz, neue Bedeutungszusammenhänge erfassen zu können und Assoziatio- zu früheren Erfahrungen zu knüpfen. Übereinstimmend wird damit die Notwendigkeit betont, h von vorgegebenen Strukturen und Repräsentationen freimachen zu können und einen Wechsel der ernen Repräsentation eines gegebenen Problems zu vollziehen. Dies setzt nach Meili (118) vier entliche Faktoren voraus:

omplexität (geistige Spannkraft),
lastizität (Fähigkeit zur Umformung von Strukturen),
anzheit (Fähigkeit zur Bildung neuer Ganzheiten),
lüssigkeit (Reichhaltigkeit von Vorstellungen und Ideen).

besondere diese Auflistung bestimmter notwendiger Eigenschaften für die intelligente Bewälti-g von Problemen bietet einen Hinweis darauf, welche kognitiven Fähigkeiten für die Problemlö-g relevant sind. Dabei fällt auf, daß gegenwärtige Computersysteme über keine der hier annten Kompetenzen verfügt. Festzuhalten ist, wie sich auch später noch zeigen wird, daß die putersimulation des menschlichen Problemlösungsverhalten zu einer Aufsplittung der komplexen schlichen Kompetenz in Strategien, Routinen, Subroutinen etc... führt (119) und den ganzheit-hen Eindruck, das Problemverständnis sowie die Reorganisationsprozesse, die für die menschli-e Problemlösung so entscheidend sind, vollständig außer Acht läßt.

wird also in der Folge zu zeigen sein, ob Maschinen zu dieser Art produktiven Denkens in der ge sind, ob sie über die Einsicht in das innere Wesen eines Problems verfügen können und wieweit Problemlösungen durch Computerprogramme überhaupt als intelligent zu bezeichnen sind.

5.2 Das syllogistische Denken

n Bereich des Denkens, der als wesentlicher Teil der menschlichen Problemlösung betrachtet rd, ist das syllogistische Denken. Dabei handelt es sich um eine Form deduktiven Denkens, das f logischen Schlußfolgerungen als Folge von Hypothesenbildungen basiert. Das deduktive Denken inhaltet Syllogismen wie etwa den Modus Ponens und wird auf die formale Logik zurückgeführt. tersuchungen ergaben, daß die reine Form logischen Denkens beim Menschen nur sehr selten zutreffen ist; logische Aufgaben verursachen entsprechend häufig Fehler, die darauf basieren, ß Menschen weniger nach formalen logischen Regeln bei Problemlösungen vorgehen, sondern sich er auf ihre Erfahrungen und Einstellungen verlassen. "In alltäglichen Situationen basieren fensichtlich viele Entscheidungen eher auf den Erfahrungen und Attitüden als auf Logik" (120). hler bei der Bewältigung logischer Aufgaben entstehen oft durch atmosphärische Eindrücke, die nen kontextuellen Zusammenhang bilden und so Fehlschlüsse verursachen. Es scheint, als seien m Menschen die abstraktformalen Gesetze der Logik entfernter als erfahrungsbasierte Strate-en. So werden Prämissen oft in formal unangemessener, erfahrungsmäßig jedoch naheliegender ise miteinander kombiniert. Die oben bereits beschriebene Diffusität von Kategorien der

Alltagssprache steht ohnehin in deutlichem Kontrast zu den streng voneinander abgrenzbaren Begriffsklassen der Formalssprache. Menschen machen demnach oftmals Zuordnungen, die eher auf den trennschwachen Alltagsbegriffen basieren als daß sie sich nach der Notwendigkeit eindeutiger Zuordnungen in der Logik richteten. Zudem wählen sie oftmals ein konkretes Beispiel aus ihren Erfahrungen aus, um eine logische Aufgabe zu lösen. Dies bedingt eine Integration unscharfer Begriffe in die Formalsprache und führt zu Fehlschlüssen. Die Berücksichtigung nicht-analytischer Repräsentationen bei der Lösung von Aufgaben der Logik stellt damit eine der Hauptfehlerquellen dar und bietet einen wichtigen Hinweis darauf, daß der Problemlösungsprozeß des Menschen nur selten gleichzusetzen ist mit formalen Deduktionen. Menschen scheinen immer dann auf ihre subjektiven Erfahrungen zurückzugreifen, wenn sich ihnen dafür eine Möglichkeit bietet. Selbst das syllogistische Denken ist demnach eine Vermischung formaler Strategien mit dem Rückbezug auf das Alltags- und Erfahrungswissen. Auch die Kognitionspsychologie mußte erkennen, daß nicht-analytische Repräsentationen für das syllogistische Denken von Belang sind und daß interne Verbindungen zwischen formalen und nichtformalen Strategien vorgenommen werden. Die Formalisierung von Problemlösungen und deren ausschließlich logische Repräsentation ist demnach kein stimmiges Modell für die Art, wie Menschen syllogistische Aufgaben bewältigen. Allemal für die Lösung hochabstrakter Probleme, die keinen Rückbezug auf Erfahrungen und Alltagswissen ermöglichen, scheint das formallogische Vorgehen zuzutreffen, nicht jedoch für logische Aufgaben, die nicht-analytische Repräsentationen zulassen.

7.6.3 Interne Repräsentation von Problemen

Um grundlegende Erkenntnisse über die Art der mentalen Problemrepräsentation zu gewinnen, wurden in der Kognitionspsychologie verschiedene Versuchsreihen unternommen. Bei der Lösung von Aufgaben, die sich auf linear angeordnete Items bezogen, stellte man sowohl propositionale als auch holistische Repräsentationen fest. Die Versuchspersonen bildeten zum Teil linguistische Problemkonfigurationen, zum Teil vorstellungsmäßige und lösten die ihnen präsentierten Probleme auf entsprechende Weise. Das bestätigt die Annahme, daß Menschen individuell unterschiedliche Repräsentationsstrukturen verwenden und diese den jeweiligen Aufgaben angleichen. "Der Prozeß der Konstruktion von Repräsentationen wird von dem Resultat der Aktivitäten, die auf diese Repräsentationen zurückgehen, gesteuert." (121). Deutlich wird hier, daß die mentalen Problemräume nicht ausschließlich auf propositionale Strukturen zurückzuführen sind, sondern Menschen sich ebenso sehr ihre Vorstellungskraft bedienen.

Eisenstadt und Kareer (122) bemühten sich um eine Analyse der internen Repräsentation von Problemräumen, die von Menschen während eines Problemlösungsvorgangs vorgenommen werden. Sie ermittelten bei allen Versuchspersonen die interne Repräsentation eines Problemraums, der bezogen auf das Untersuchungsgebiet des Schachspiels, Wissen über das gesamte Spielgeschehen und die Spielregeln, die aktuelle Stellung des Gegners und den bisherigen Spielverlauf umfaßte. Dabei fiel auf, daß subjektiv gefärbte Wahrnehmungen des Spielfeldes als Basis für die Bildung der internen Repräsentation fungierten, wobei sich Verzerrungen der realen Situation überall finden ließen. "The mapping between a configuration of pieces in the real world and the subjective perception of those pieces is not perfect"(123). Die interne Repräsentation der Problemlage ist damit subjektspezifisch modifiziert entsprechend den individuellen Wichtungen, die jede Person hinsichtlich einer bestimmten Problemsituation vornimmt. Gleiche Szenen werden demnach von Subjekt zu Subjekt unterschiedlich wahrgenommen, je nach Erfahrungshintergrund und der darauf basierenden Organisation der Elemente in einem Problemraum.

Während die Kognitionspsychologie ein relativ mechanisches Modell für die Repräsentation eines Problemraums entwirft, und, sich dabei berufend auf die Forschungsergebnisse von Newell und Simon (125), den Problemraum konfiguriert sieht durch den Anfangs- und den Endzustand sowie die dazwischenliegenden Problemstadien, bietet die Gestaltpsychologie ein übergreifenderes Konzept an, mit dem die differenten Repräsentationen von Menschen eher begreiflich werden. Drei Prinzipien werden hier als grundlegend angesehen für die menschlichen Wahrnehmungsprozesse: Nachbarschaft, Ähnlichkeit und Kontinuität ("proximity, continuity, similarity") (126). So werden Wahrnehmungsprozesse dadurch beeinflußt, daß Objekte, die in unmittelbarer Nähe zueinanderliegen wie auch Objekte, die Ähnlichkeiten miteinander aufweisen, eher wahrgenommen und erinnert werden als voneinander entfernte Objekte. Ebenso werden Tatsachen, die eine gewisse Kontinuität aufzeigen, eher erfaßt als diskontinuierliche Fakten. Die Prinzipien der Gestaltpsychologie verdeutlichen damit die Relevanz von Bedeutungsrelationen für die mentale Konfiguration eines Problemfeldes, wobei diese bedeutungsmäßige Erfassung auf all jenen Erfahrungen basiert, die ein Mensch mit allgemeinen und speziellen Problemsituationen machte.

Erfassen von Ähnlichkeit und Kontinuität setzt zweierlei voraus:

e Einsicht in das Problem
lgemeines Wissen über Problemsituationen.

auf dieser Basis ist die mentale Konfiguration eines Problemraums in der Weise möglich, wie für den Menschen typisch ist. Weiter ist zu berücksichtigen, daß die vom Menschen vorgenommene mentale Repräsentation des Problemraums vollzogen wird gemäß den subjektiven Bedeutungszuungen; "internal representations must be able to represent the external world in terms of ingful or highly familiar segments" (127).

lt man nun an diesem Punkt erneut die Frage nach den maschinellen Möglichkeit der Problemreentation, so wird zunächst deutlich, daß bisherige Programme der Künstlichen Intelligenz dadurch charakterisieren lassen, daß die Problemrepräsentation immer durch den Programmerler vorgenommen wird, d.h. eine interne Repräsentation bislang nicht von Systemen selbst lisiert werden kann. Und es erscheint überhaupt fraglich, ob eine Maschine jemals dazu in der sein wird, Einsicht in eine Problemstruktur zu gewinnen sowie Kenntnisse zu erwerben über innere Wesen eines Problems. Die übereinstimmend als relevanter Kern der menschlichen lligenz eingestufte Einsicht in das Wesen von Phänomenen, d.h. die Fähigkeit, die bloße omenologische Ebene zu verlassen und eine tiefere Einsicht in das Gegebene zu gewinnen, int demnach maschinell nicht möglich zu sein.

4 Problemlösungsstrategien

chen verfügen bei der Lösung von Problemen über mannigfaltige Strategien. Man differenziert allgemein zwischen algorithmischen und heuristischen Verfahren. Algorithmische Strategien hnen sich aus durch ein rezeptartig determiniertes Vorgehen; heuristische Methoden lassen mit Faustregeln vergleichen, die Menschen bei der Lösung von Problemen anwenden. Heuristi- Verfahren garantieren nicht unbedingt das Finden einer Lösung, doch wird diese im positiven sehr viel schneller gefunden. Sie beinhalten die Suche nach Beziehungen zwischen Tatsachen gründen oftmals auf Erfahrungen und dem Wissen über ein bestimmtes Problemgebiet.

ich wie die KI-Forschung geht die Kognitionspsychologie von einem Problemkonzept aus, nach sich viele Probleme als Transformationsprobleme begreifen lassen. Entsprechend stellen sie "Heuristik der Mittel-Ziel-Analyse" (128) als eine fundamentale Problemlösungsstrategie dar, auf der kontinuierlichen Dezimierung der Differenz zwischen Ausgangs- und Zielzustand durch ndung von Operatoren oder Regeln basiert. Diese Heuristik impliziert die Bildung von erzielen, da die Operatoren oftmals nur auf Zwischenlösungen zielen. Die Formulierung von erzielen wird insbesondere für komplexe Probleme als notwendig erachtet aufgrund der begrenzGedächtniskapazität des Menschen. "Wenn Menschen versuchen, alle Schritte, die man bei der ng eines Problems machen muß, im Auge zu behalten, dann würde ihre Erarbeitungskapazität nerlich mehr strapaziert, als wenn sie sich nur an den Schritten der Lösung eines spezifien Unterproblems orientieren. " (129). Dabei kann nicht ausschließlich von einer strikt wärtsschreitenden Abbarbeitung der Unterziele ausgegangen werden, da oftmals Problemlösungen sschritte erforderlich machen (130), somit die Differenz zwischen Ausgang und Ziel wieder größert werden muß, um die richtige Lösung zu erreichen.

Mittel-Ziel-Heuristik sollte jedoch hinsichtlich ihrer Relevanz für Problemlösungen nicht rbewertet werden, da Menschen in den meisten Problemlösungsprozessen mit multiplen Strategien eiten und kontinuierlich eine problemspezifische Anpassung ihres Vorgehens vornehmen. Eine tere wichtige Problemlösungsstrategie ist die Suche; die Kognitionspsychologie - und auch r stimmt sie mit Auffassungen innerhalb der KI-Forschung überein - begreift sie sogar als das dament von Problemlösungen. "Das Suchen ist der beherrschende Aspekt von Problemlösungsaktiäten" (131). Es wird angenommen, daß jeder Planungs- oder Lösungsprozeß auf Suchvorgängen iert. Suchprozesse erfolgen häufig in Form einer Gliederung unterschiedlicher Optionen, die h graphisch durch einen Suchbaum darstellen lassen. Dieser Baum läßt sich entsprechend seiner nen oder seiner hierarchischen Verknüpfungen, also nach Breite oder Tiefe verfolgen. Die allelität zu Suchprozessen in KI-Programmen, z.B. der "breadth-first-search" oder der pth-first-search", ist offensichtlich.

e dritte Problemlösungsstrategie, die ebenfalls in Zusammenhang steht mit Konzepten der

KI-Forschung, ist die Methode des Generierens und Testens von Lösungen. Diese Vorgehensweise besteht in der zufälligen oder wissensbasierten Generierung von möglichen Lösungen und einer anschließenden Überprüfung der Hypothesen. Entsprechende Strategien erweisen sich jedoch nur dann als effizient, wenn entweder eine Einschränkung der Hypothesen auf der Basis von Wissen vorgenommen wird oder der Problemraum klein ist.

Alle hier aufgeführten Heuristiken stehen in engem Zusammenhang mit der Künstlichen Intelligenz, basieren somit zum Teil auf der erfolgreichen Konzeption entsprechender Programme. Dabei muß deutlich in Frage gestellt werden, ob die Annahme innerhalb der Kognitionspsychologie legitim ist, nach der Konzepte über kognitives Verhalten von Menschen dann als valide betrachtet werden können, wenn ein entsprechendes Computerprogramm erfolgreich ist. Es wird sich später zeigen, daß die strukturelle Vergleichbarkeit (nie die ontologische) nur in jenen Fällen angenommen werden kann, wo es sich um definitorische und mechanisierte Lösungsprozesse handelt.

Problemlösungen erweisen sich somit in all jenen Fällen als besonders schwierig, wo die Zahl möglicher Lösungen groß, das Problem also komplex ist. Infolgedessen sind Strategien zur Begrenzung von Möglichkeiten ein notweniger Faktor für ein effizientes Vorgehen. Als primäre Strategie für diese Eingrenzung erweist sich der Rückbezug auf Erfahrungen für den Menschen als typisch. Dieser Rückgriff auf Erfahrungen ist oftmals gleichzusetzen mit einem Denken in Analogien, "bei dem wir eine Parallele zwischen einer nur schlecht verstandenen Sachlage und einer solchen ziehen, die wir vorher erfahren oder gelernt haben oder von der wir mehr wissen" (132). Das Wissen aus früheren Situationen, insbesondere aber Erfahrungen, die sich auf einstmalig erfolgreiche Strategien beziehen, können damit für eine aktuelle Problemlösung von entscheidender Bedeutung sein. Die Feststellung von Analogien fußt auf der Wahrnehmung von Ähnlichkeiten zwischen Situationen oder Objekten. Dies impliziert eine ganzheitliche Erfassung von Objektkonfigurationen, die als vergleichbare Gestalten im Gedächtnis verankert sind. Das analoge Denken ist charakteristisch für die erste, oftmals unbewußt ablaufende Phase des Problemlösungsprozesses, in der bereits eine Einschränkung des Problemraums erfolgt. Die angenommene ganzheitliche Wahrnehmung impliziert die Existenz von mentalen Skizzen einer Problemsituation, d.h. einer analogen oder holographischen Repräsentation im Gedächtnis. Gerade diese erste Phase des Problemlösungsprozesses ist entscheidend für die Differenz zwischen menschlichen und maschinellen Problemlösungen. Indem der Mensch durch seinen Rückgriff auf Erfahrungen und sein Denken in Analogien zu einer umfassenden, ganzheitlichen Wahrnehmung des Problems befähigt ist, schafft er so die Basis für die nachfolgende Selektion adäquater Strategien zur Problemlösung. Erst die Einsicht in das Wesen eines Problems ermöglicht die Determination des Problemraums und die nachfolgende Anwendung von Suchprozeduren, so daß sich der Problemlösungsprozeß nicht reduzieren läßt auf die Anwendung von heuristischen und suchenden Verfahren.

Zusätzlich relevant für den Problemlösungsprozeß sind probabilistische Schlüsse, da sowohl Alltagssituationen als auch fachspezifische Situationen häufig durch Unsicherheiten der Urteile und Prognosen gekennzeichnet sind. "Probabilistische Schlüsse sind ein bedeutsamer Bestandteil des Problemlösens, denn wir wissen nur selten mit Sicherheit, welche Strategie die beste ist; bei der Wahl einer Strategie sind Individuen nämlich häufig gezwungen, die Erfolgswahrscheinlichkeit einer spezifischen Strategie zu beurteilen" (133). Es existieren unterschiedliche Vorgehensweisen bei probabilistische Entscheidungen. Als erstes ist die Strategie der Repräsentativität zu nennen, d.h. der Prüfung, ob ein Item Mitglied einer bestimmten Klasse, z.B. ein Prototyp ist. Die probabilistischen Einschätzungen von Menschen basieren zumeist sehr viel mehr auf dieser Kategoriezuordnung als auf Wahrscheinlichkeiten und Statistiken, d.h. objektivierbaren Maßstäben für die Probabilität. "Ganz offensichtlich kennen Individuen den Nutzen von statistischen Informationen, aber sie sind bereit, diese zu vernachlässigen, wenn irgendwelche anderen Informationen verfügbar sind, die ihnen die Verwendung der Strategie der Repräsentativität erlaubt" (134).

Abstrakte Gesetzmäßigkeiten haben für den menschlichen Problemlösungsprozeß ungleich geringere Bedeutung als erfahrungsbedingte Möglichkeiten von Ereigniszuordnungen. Dieses Vorgehen erweist sich am Alltag als äußerst effektiv, selbst wenn es in manchen Fällen, die ein formaleres Vorgehen benötigen, zu Fehlern führt. Die Strategie, probabilistische Schlüsse auf der Basis von Kategorisierungen vorzunehmen, entspricht der menschlichen Art, die Welt kategorial und gestalthaft zu erfassen. So stellt die Fülle an Erfahrungen, episodischem Wissen und Vorstellungen letztlich die Basis dar, mit Unsicherheiten operieren und unvollständige Informationen ergänzen zu können.

Eine weitere probabilistische Strategie, die Strategie der Verfügbarkeit, ist charakterisiert

ch eine Beurteilung von Ereigniswahrscheinlichkeiten auf der Basis von Beispielen. Je rascher o ein Beispielereignis verfügbar ist, als um so wahrscheinlicher wird dieses Ereignis gestuft. Probabilitätseinschätzungen des Alltags basieren in hohem Maße auf der Verfügbarkeit licher Ereignisse. Häuften sich beispielsweise in einem kurz zurückliegenden Zeitraum gzeugunglücke, wird dieses Ereignis als wahrscheinlich eingeschätzt, da unmittelbar eine reichende Anzahl an Beispielen für ein derartiges Ereignis erinnert werden können. Wahreinlichkeitsurteile sind damit in hohem Maße kontext-, subjekt- und ereignisabhängig, ein ekt, der für die Implementation von Sicherheitsfaktoren in Expertensystemen, die ja eben auf jektiven Expertenurteilen basieren, von außerordentlichem Belang ist und deren vermeintliche ektivität sehr in Frage stellt. Das typische menschliche Problemlösungsverhalten stellt sich als eine Mischung von hypothesengesteuertem und stimulusgesteuertem Verhalten. Damit findet e flexible Variation der Problemlösung statt, indem zum Teil die Hypothesen, zum Teil die prungsdaten die Interpretation der Problemlage beinflussen. Menschen alternieren dabei schen aktiven, d.h. hypothesenbildenden Strategien und passiven, ungerichtet explorierenden sen, d.h. vollziehen eine variierende und kreative Form der Problemlösung, wie sie bislang r ein Computersystem unvorstellbar erscheint. Die von der Gestaltpsychologie hervorgehobenen nzipien der Familiarität und Kontinuität spielen bei der Selektion der jeweils adäquaten gehensweise insofern eine relevante Rolle, als die interne Repräsentation des Problemfeldes diesen Prinzipien geprägt ist. Zusätzlich jedoch wirkt das äußere und innere Umfeld mit in Problemlösungsprozeß hinein. So ist beim Menschen zwar das jeweilige Problemfeld im Mittelkt seines Augenmerks, doch lassen sich seine Wahrnehmungen nicht auf die spezifische Aufgastellung beschränken, da durch das Randbewußtsein(135) die Fülle menschlichen Hintergrundwisis in den Problemlösungsprozeß einfließt und die Interpretation der verschiedenen Stadien einflußt. Entscheidend ist die aktive interne Repräsentation des Problems, die eine Modifikaon und Erweiterung des Problemraums ebenso zuläßt wie dessen antizipierte oder reale Umstrukrierung; "we suggest that the internal representation of familiar patterns is most likely an tive procedural representation, not just a static listing of the configuration of the pieces" 36).

tersuchungen über menschliche Problemlösungsvorgänge, seien es Studien über die medizinische oblemlösung oder über das menschliche Verhalten bei Spielen, zeigten immer wieder Unterbreungen im Problemlösungsvorgang auf. Eisenstadt und Kareer (137) identifizierten diese Unterechungen als Reflexionen über den Problemlösungsprozess, die sie folgendermaßen zu differeren versuchten:

- Konfirmierung, d.h. Bestätigung von Hypothesen durch die Suche nach Gruppierungen oder Bedingungen, die zur Verifikation der Hypothese führen;
- Erforschung, d.h. eine nicht hypothesen- oder zielgerichtete Suche nach Strategien oder Konfigurationen, die zur Lösung des Problems beitragen können;
- Neubestätigung, d.h. Überprüfung von Situationen, inweit vormalige Einschätzungen korrekt waren;
- Vorstellung/Antizipation, d.h. gedanklicher Entwurf neuer Strategien und Abschätzung der zu erwartenden Konsequenzen ihrer Anwendung.

eflektiert man diese Komponenten des Problemlösungsprozesses unter dem Blickwinkel einer rvisierten maschinellen Simulation, so werden ad hoc Barrieren für die Übertragbarkeit deutch. Die Erforschung neuer Strategiemöglichkeiten beispielsweise ist für den Menschen nur auf er Grundlage seiner Erfahrungen sowie seiner Fähigkeit möglich, Analogien zwischen einer ctuellen und früheren Situationen finden zu können. Ebenso setzt die Antizipation von Konseenzen bestimmter Strategieanwendungen eine Form der kreativen Intelligenz voraus, die bislang if Maschinen nicht übertragbar ist, nämlich die hypothetische Neukonfiguration der gegebenen bjekte und eine gedankliche Umstrukturierung des Problemraums, die sich als Folge antizipierter trategieanwendungen ergibt. Die explorierenden Phasen, die den menschlichen Problemlösungsproeß ebenfalls auszeichnen, setzen voraus, daß die zufällige Entdeckung von Mustern und Problemstadien möglich ist, d.h. bedeutungsmäßig relevante Konfigurationen während dieser passiven xploration erkannt werden (z.B. Umherschweifen des Blicks, Gedanken einfach fließen lassen). ieses Erkennen problemrelevanter Konfigurationen impliziert jedoch wiederum die Einsicht in die iefere Struktur eines Problems, die ja, wie oben bereits ausgeführt, für eine Maschine nicht öglich ist.

esümierend erscheint somit das Problemlösungsverhalten des Menschen in folgenden wesentlichen unkten als qualitativ different gegenüber der maschinellen Problemlösung:

- die Fähigkeit zur Einsicht in ein Problem,
- Fluktuation zwischen stimuli- und hypothesengerichteten Strategien sowie zwischen explorierenden und direktiven Vorgehensweisen,
- der Wechsel zwischen unterschiedlichen Repräsentationen des Problems und die Fähigkeit zur Umstrukturierung des Problemraums,
- die Orientierung an Kategorien wie Familiarität und Kontinuität bei der Wahrnehmung der Problemsituation,
- der Einfluß des Randbewußtseins, durch das Hintergrundwissen in die Problemlösung miteinfließt, die Fähigkeit zur Antizipation der Konsequenzen von Strategien.

Insgesamt betrachtet anerkennt selbst die Kognitionspsychologie einen hohen Anteil an unbewußten Verarbeitungsprozessen bei der menschlichen Problemlösung, die sich mit den bislang beschriebenen Strategien nicht hinreichend fassen lassen. Man ist allgemein der Ansicht, "daß eine nicht- bewußte Verarbeitung bei der Lösung schlecht-definierter Probleme einen substantiellen Beitrag leistet" (138). Dies scheint insbesondere auf kreative Problemlösungen zuzutreffen, für die eine sogenante "Brüte-Periode" (139) sowie blitzartige, nicht unmittelbar begründbare Einfälle typisch sind. Die Kognitionspsychologie vertritt die Annahme, daß möglicherweise bekannte Strategien auf einer unterbewußten Ebene Anwendung finden werden, schließt jedoch die Existenz neuer, bislang unbekannter Stratgeien nicht aus. Die Existenz unbekannter oder unbewußt ablaufender Prozesse bietet einen Hinweis darauf, daß mit den bisher identifizierten Strategien zur Problemlösung der menschliche Problemlösungsprozeß nicht hinreichend beschrieben werden kann. Allemal der Verweis auf die Relevanz des analogen Denkens bietet eine Expansionsmöglichkeit des Problemkonzepts. Maschinelle Transformationen der meisten der oben genannten Strategien führten zwar bei formalen Problemen zu befriedigenden Resultaten, jedoch konnte bislang kein Programm das Ettikett schöpferischer oder eigenständiger Problemlösung für sich in Anspruch nehmen. Wesentlich für die bislang bemerkbaren Defizite bei maschinellen Problemlösungen scheint insbesondere die fehlende Einsicht in die Problemstruktur und der Mangel an Erfahrungen zu sein, wesentliche Aspekte des analogen Denkens. Inwieweit derartige Fähigkeiten an holographische Verarbeitungsmuster im menschlichen Gehirn gekoppelt sind, kann gegenwärtig noch nicht befriedigend geklärt werden.

7.6.5 Das schöpferisch-kreative Problemlösen

Wie oben ersichtlich wurde, ist das menschliche Problemlösungsverhalten sehr mannigfaltig und findet auf sehr unterschiedlichem Niveau statt. Zwar greifen Menschen bei der Bewältigung von Aufgaben oftmals auf ihnen bekannte, vorgegebene Lösungsstrategien zurück, doch ist der Problemlösende auch immer wieder gezwungen, eigenständige Lösungswege zu entwickeln und schöpferisch-innovativ tätig zu werden. Das kreative Problemlösen beinhaltet besondere Charakteristika, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

Der Begriff des schöpferischen Problemlösens wurde von Wertheimer (140) geprägt und bezeichnet all jene Lösungsversuche, die eigenständig und nichtdeterministisch ablaufen. Im Versuch, den Prozeß des schöpferischen Problemlösens zu beschreiben, differenzieren Krech/Crutchfield (141) zwischen vier Stadien:

- die Vorbereitungsphase (Ideenspiele und Assoziationen zur Aufgabe);
- die Inkubationsphase (Ruheperiode, das Problem wird beiseite gelegt, unbewußte Weiterbeschäftigung mit dem Problem);
- die Illuminations- oder Erleuchtungsphase (Aha-erlebnis, Einsicht, plötzliches Erkennen);
- die Überprüfungsphase (Analyse, Suche und Strategieanwendung).

Während die deterministischen Problemlösungen vorwiegend in der vierten Phase stattfinden, in der die Anwendung adäquater Strategien erfolgt, stellen die drei vorherigen Phasen den eigentlichen kreativen Prozeß dar. Im Ideenspiel und den fließenden Assoziationen sowie in der nachfolgenden Ruheperiode wird auf oftmals unterbewußter Ebene die innere Struktur des Problems erfaßt. Die so gewonnene Einsicht dringt in das Bewußtsein des Menschen in Form sogenannter "Aha-Erlebnisse" oder oft beobachteter blitzartiger Einfälle, die erst die Anwendung von neuen Strategien möglich macht. Das eigentlich Schöpferische bei der nichtdeterministischen Problemlösung liegt ja eben auch in der Fähigkeit, das Wesensmäßige zu durchschauen und als Grundlage für die weitere Exploration einzusetzen.

Phase des assoziativen Gedankenflusses ist wesentlich von Vorstellungen geprägt. Es kann als sache angenommen werden, "daß vieles in unserer Erfahrung beim Durchdenken eines Problems aus ktvorstellungen besteht, Vorstellungen von Gegenständen, die im Hier und Jetzt nicht send sind und die in der physikalischen Welt nicht einmal irgendwo zu existieren brauchen" 2). Dabei können die Vorstellungsformen in hohem Maße variieren. James (143) wies darauf hin, sich die assoziative Phase im schöpferischen Problemlösungsprozeß durch ein Ineinanderflie- von Vorstellungen charakterisieren läßt, d.h. durch einen anfangs noch ungerichteten Strom flüchtigen Bildern und Ideen.

rend diese Kennzeichen des schöpferischen Problemlösungsprozesses noch verbalisierbar sind - berühmt gewordenes Beispiel ist Einstein, der in Berichten über seine Entdeckungen die evanz der Vorstellungsbilder hervorhob -, stellt sich die Inkubations- oder Ruhephase als n durchschaubares Feld dar. Manche Kognitionspsychologen und KI- Forscher (144) gehen davon , daß in diesen Phasen unbewußt mit ähnlichen regelartigen Strategien am Problem gearbeitet d, wie dies in den bewußten Phasen zu festzustellen ist. Da sich jedoch diese Phase in onderem Maße den psychologischen Methoden schon deshalb entzieht, weil die mental ablaufenden zesse dem Individuum ja selbst nicht bewußt werden, konnte bislang kein überzeugendes Indiz diese Annahme ermittelt werden. So bleibt gegenwärtig lediglich festzuhalten, daß die ephasen für das schöpferische Problemlösen typisch sind und einen wesentlichen Einfluß auf olgreiche Lösungsfindungen nehmen. Plötzliche Einschübe markieren oftmals den Wendepunkt im blemlösungsprozeß, d.h. offenbaren entweder die zu diesem Zeitpunkt gewonnene Einsicht in ein blem oder indizieren intern vorgenommene Umstrukturierungsprozesse, die aus verfahrenen uationen herausleiten. Erst die vierte Phase ist mit den zuvor beschriebenen Strategien zur blemlösung insofern kongruent, als hier verschiedenste Strategien Anwendung finden zur rprüfung und Bearbeitung des Problems.

gegenwärtig völlige Fehlen der primären Phasen des Problemlösungsprozesses in Computerpro- mmen weist darauf hin, daß schöpferische Problemlösung im Sinne von eigenständiger Strategie- wicklung in gegenwärtig existierenden Computerprogrammen noch nicht realisiert werden konnte. ier sind Programme zur unabhängigen Strukturierung des Problemraums in der Lage, noch können einsichtsvolle Umstrukturierungen der internen Repräsentationen eines Problems vornehmen. enso verfügt keines der heutigen Computersysteme über Fähigkeiten, die die Entwicklung novativer Lösungen ermöglichen, geschweige denn völlig neue Methoden zur Bewältigung von blemen hervorbringen können. Die Frage nach der potentiellen Kreativität von Computern muß n augenblicklichen Stand der Forschung aus gesehen verneint werden. Und einige Faktoren rechen dafür, daß kreative Maschinen zumindest in absehbarer Zukunft auch nicht existieren rden.

e Frage nach der Kreativität von Computer läßt es notwendig erscheinen, den Begriff der eativität nochmals zu überprüfen. Ähnlich wie das Denken bleiben Charakterisierungsversuche r Kreativität diffus und unklar. Es existieren weder detaillierte Beschreibungen dieses danklichen Prozesses noch läßt sich eine einheitliche Begriffsbenutzung finden. Dennoch hat der Mensch eine Vorstellung davon, was Kreativität ist, er empfindet also eine Person als eativ oder nicht kreativ. Beschreibungen von kreativen Personen, die nach ihren schöpferischen asen befragt wurden, offenbarten, daß der kreative gedankliche Prozeß oft als ich-fern erlebt rd und zumeist undurchschaubar für die betreffende Person abläuft. Festzustellen ist bei sonders kreativen Personen der Reichtum an Ideen, Einfällen und Vorstellungen. "Der Kreative rd oft von Einfällen geradezu bedrängt, Bilder, Assoziationen oder Gedanken reihen sich einander, wirbeln durcheinander, führen in neue Regionen." (146). Kreative Menschen verspüren nen Drang nach äußerem Ausdruck, beschreiben sich oft selbst als getrieben, ja geradezu quält von der Fülle ihrer Ideen. Typisch scheint der dauernde Fluß an Ideen, Assoziationen und aginationen zu sein, die sich in einem chaotischen Durcheinander befinden. Die Verspieltheit s Verstandes ermöglicht die ständige Fluktuation neuer Gedanken und die ungeordnete Verknüp- ng völlig divergenter mentaler Phänomene. "Gerade der anfängliche Verzicht auf Ordnung scheint er für kreative Leistungen unentbehrlich zu sein" (147). Intensive Vorstellungen, wahrneh- ngsnahe interne Repräsentationen unterschiedlichster Genese sowie eine Flut an anschaulichen ildern bewirken die große Einbildungskraft, die für den kreativen Menschen charakteristisch st. Selbst abstrakte Repräsentationen und formale Ideen lassen sich zu den Imaginationen ählen, da sie hinsichtlich ihrer Agilität und Intensität den anschaulichen Vorstellungen quivalent sind. Kreative Prozesse sind niemals affektiv neutral, sondern stets begleitet von iner emotionalen Erregung und einer starken Motiviertheit. Der kreative Akt wird oft gleichge- etzt mit der Suche nach Erweiterung des "phänomenalen Selbst", d.h. einer Form der Selbstent- ßerung oder "Selbstverdoppelung". Die damit einhergehende libidinös gefärbte Erregung erkannte

bereits Freud in seinen Beschreibungen der Sublimationen. Er wies auch darauf hin, daß der kreative Prozeß oftmals des hellen, rationalen Bewußtseins entbehrt, sondern eher im Vor- oder Unterbewußten stattfindet und erst durch die blitzartigen Einfälle und Aha-erlebnisse ins ich-nahe Bewußtsein gelangt. Neisser (148) bezeichnet das kreative Denken als multiplen mentalen Prozeß. Seine Unterscheidung von sequentiellen und multiplen gedanklichen Prozessen ist wesentlich für die Frage nach einer möglichen Kreativität von Computern. Nicht nur die Existenz verschiedener innerer Repräsentationen von Objekten, seien sie vorstellungsmäßig oder abstrakt, sondern auch das Nebeneinander völlig unterschiedlicher Zugangsformen und das Ineinanderwirken vieler gedanklicher Prozesse kennzeichnen die menschliche Kreativität. Zudem verfügt der Mensch in größerem oder minderem Umfang über Sensibilität gegenüber neuen Möglichkeiten der Synthese und Bisoziation. Koestler (149) stellt den kreativen Akt gar als neue Verknüpfung von unterschiedlichen Bezugsrahmen oder gedanklichen Matrizen dar. Kreative Ideen resultieren oftmals aus der anfänglich verspielten Synthese von völlig unterschiedlichen Bereichen, deren Relevanz dann urplötzlich erkannt wird. Das spielerische Assoziieren verschiedener Gedankengebäude, die mentale Verbindung divergenter Vorstellungen, die Bisoziierung von getrennten Bezugsrahmen sind damit das Fundament des kreativen Einfalls.

Diese Beschreibungen der Kreativität, die zum Teil aus der Beobachtung kreativer Menschen und ihrer gedanklichen Produkte stammen, stehen in deutlichem Kontrast zu den typischen Abläufen in Computerprogrammen. Ein Computersystem verfügt weder über die Flut an Vorstellungsbildern und unterschiedlichen Ideen, noch kann es in spielerischer Form divergente Gedanken miteinander verknüpfen, geschweige denn intuitiv deren Relevanz erahnen. Die Beschreibung eines kreativen Menschen mit seiner Freude an Anomalien, seiner Skepsis gegenüber glatten Lösungen, seinem ästhetischen und emotionalen Empfinden für harmonische Vorstellungen, seinem variablen Denkstil und seiner Fähigkeit, intuitive Sprünge über gesetzte Grenzen hinweg zu machen, steht der Charakterisierung eines heutigen Computersystems diametral entgegen. Die Verspieltheit des Verstandes, die sich im Fluß ungeordneter Imaginationen offenbart, identifiziert eine Form des Denkens, wie sie bislang noch dem Menschen vorbehalten ist. Ob Computer jemals über diese Fülle an Ideen und Impressionen verfügen können, wie sie im kreativen Prozeß zutage treten, bleibt fraglich. Gegenwärtig sind die Resultate der KI-Forschung eher durch folgendes Zitat gekennzeichnet: "AI is the science of making machines productive and people creative"(150).

Allgemeine Bemerkungen zur medizinischen Problemlösung

sich bisherige Evaluationsstudien auf den Vergleich der Problemlösungsresultate von Menschen Computern beschränkten, nicht jedoch der Problemlösungsprozeß an sich untersucht wurde, soll Folgenden näher auf den zweiten Aspekt eingegangen werden. Durch die Identifizierung der onderheiten medizinischer Problemlösungsprozesse und der erforderlichen Fähigkeiten von izinern wird der Versuch unternommen, grundsätzliche Mängel heutiger Expertensysteme hervor-eben sowie mögliche Folgen ihres unbeschränkten Einsatzes aufzuzeigen.

onders charakteristisch für die medizinische Problemlösung ist dabei die Notwendigkeit, ig mit unsicherem und oftmals unvollständigen Wissen umgehen zu müssen, da viele Fakten in Medizin nicht mit letztgültiger Sicherheit angenommen werden können. "Problem solving in icin has been aptly ... described as 'The process of making adaequate decisions with inad-uate information'"(1).

oblemlösungen in der Medizin werden häufig gleichgesetzt mit dem Prozeß der Diagnosefindung. Anlehnung an Newell und Simon (3) vertreten Elstein et al. (4) die Auffassung, daß medizini-e Probleme mental als Problemräume repräsentiert werden, wobei diese Strukturierung des oblems das weitere Vorgehen maßgeblich beeinflusse. Doch läßt sich die Annahme eines durch gangs- und Zielzustand klar determinierten Problemraums nur bedingt auf den Bereich der izin übertragen. Dies liegt einerseits an der Unvollständigkeit der Ausgangsdaten und der trukturierung des Problemraumes im Zuge der Anamneseerhebung und dabei oft bereits notwendi- globaler Diagnosen, andererseits an der "offenen" Problemstellung, wie sie für die Medizin Allgemeinen typisch ist. Der von Elstein et al. (5) vorgeschlagene Terminus "offene Problem-llung" bezeichnet die Tatsache, daß in der Medizin nur selten klare Zielzustände für ein zifisches Problem vorliegen. Die Schwierigkeiten, die sich daraus für die Übertragung des blemraum-Modells auf die Medizin ergeben, werden umgangen, indem angenommen wird, daß othesen, die bereits unmittelbar zu Beginn einer Problemlösung gebildet werden, als hypothe-che Zielzustände fungieren. Durch die Hypothesenbildung erfolge somit die Determination und ichzeitige Einschränkung des Problemraums und damit einhergehend eine Dezimierung der zu tragenden Ausgangsdaten.

en diesen Charakteristika der medizinischen Problemlösung (offener Problemraum, Relevanz der engewinnung, unsicheres und unvollständiges Wissen, hypothesenbedingte Einschränkung des hraums) lassen sich einige typische Schwierigkeiten beschreiben. So sind in der Medizin sehr erschiedliche Wissensstadien möglich, es existieren viele Operatoren zur Datengewinnung und ifikation einer Hypothese, so daß allein die Selektion adäquater Lösungsmechanismen problema-sch ist. Zusätzlich lassen sich für nahezu jedes Problem mehrere alternative Lösungswege den, die richtig sein können, d.h. ein Mediziner muß dazu in der Lage sein, situationsadäquat Implikationen verschiedener Ebenen mehrerer Wege mitzubedenken; hierzu stellen sich etwa gen wie:
erbaut die Diagnostik und Therapie des eingeschlagenen Weges die Diagnostik und Therapie ieler anderer potentieller Wege
welche möglichen Diagnosen können, wenn sie nicht sofort berücksichtigt werden, aber etwa zutreffen, unwiderbringliche Nachteile für den Patienten bedeuten
existieren Wege mit geringen Gefahren bzw. Belästigungen des Patienten während der Diagnostik (etwa nicht-invasive Methoden usw.) und welcher Grad an dadurch verminderter Güte der Aussage ist noch akzeptabel
welche Kosten entstehen bei erfolgreichem Beschreiten eines Wegen, welche Kosten entstehen, falls es sich um eine diagnostische Sackgasse handelt

2 Theoretische Basis

2.1 Theoriekonzepte zur medizinischen Problemlösung

fgrund der engen Beziehung zwischen der KI-Forschung und den kognitionspsychologischen dellen zur medizinischen Diagnosefindung soll dem kognitionspsychologischen Ansatz der ndeutige Vorrang eingeräumt werden gegenüber mathematischen und entscheidungstheoretischen nzepten.

e grundlegende Methode dieses Theorieentwurfs besteht in der Verbalisierung des gedanklichen ozesses, der der Problemlösung zugrunde liegt und der bei den Versuchspersonen durch soge-

nannte "thinking-aloud"- Protokolle eruiert wird. Das bedeutet etwa für die Studie Elsteins (6) eine der umfangreichsten Untersuchungen zur medizinischen Problemlösung, daß Mediziner, denen bestimmte Patientenfälle präsentiert wurden, den mentalen Prozeß ihrer Diagnosefindung verbalisieren. Mit dem kognitionspsychologischen Ansatz wird den besonderen Bedingungen von Problemlösungen in der Medizin insofern entsprochen, als die Relevanz von Wahrnehmungsprozessen, die Rolle des Gedächtnisses und die Bedeutung früherer Erfahrungen betont sowie die besondere Struktur medizinischer Probleme ausreichend berücksichtigt wird.

Die Grenzen, die demgegenüber formallogische und entscheidungstheoretische Ansätze aufweisen, wurden von Wason/Johnson-Laird (7) bereits früh erkannt: "we realize first that there was no existing formal calculus which correctly modelled our subject's inferences and second that no purely formal calculus would succeed. Content is crucial and this suggests that any general theory of human reasoning must include an important semantic component". Der hier implizierte Hinweis auf die Relevanz von Wissen und Erfahrung wurde in der kognitions- psychologischen Konzeption erstmalig theoretisch berücksichtigt; diese Annahme erhärtete sich in allen Untersuchungsergebnissen.

Untersuchungen zum Problemlösungsverhalten fanden bis dahin oftmals ohne ausreichende theoretische Basis statt, d.h. man versuchte relativ unbestimmt, die Mechanismen herauszufinden, die dem menschlichen Problemlösungsverhalten zugrunde liegen. Lediglich die im Jahre 1968 von Kleinmuntz (8) durchgeführte Studie zum Problemlösungsverhalten von Neurologen basierte auf einem theoretischen Modell. Kleinmuntz bildete den Entscheidungsprozeß der Kliniker in einer binären Baumstruktur ab, wobei die Länge der Verkettung umgekehrt proportional zur Expertise begriffen wurde, d.h. gute Experten sind danach zu einer maximalen Reduktion diagnostischer Schritte befähigt. Hayes (9) vertrat wenig später die Auffassung, daß eine spezielle Aufgabe im Kurzzeitgedächtnis verankert werde und eine Verknüpfung erfolge zwischen der aktuellen Frage und dem Wissen und der Erfahrung eines Menschen. Eine der anerkanntesten Studien zur medizinischen Problemlösung ist die bereits erwähnte Untersuchung Elsteins, auf die sich viele KI-Forscher bei der Konzeption medizinischer Expertensysteme beziehen. Diese Studie gründet auf dem Konzept von Newell und Simon(10), die von einer grundlegenden Heuristik ausgehen, der sogenannten b'Means—end-analysis"(11). Danach besteht die Problemlösung vor allem darin, die Differenz zwischen Ausgangs- und Zielzustand in einem gegebenen Problemraum durch Anwendung von Operatoren (Regeln, Datengewinnung, ...) zu dezimieren. Elstein und andere(13) unternahmen in ihrem großangelegten Fünfjahresprojekt auf der Basis dieses Ansatzes verschiedene Untersuchungen zum medizinischen Problemlösungsverhalten. Vorrangige Methode war dabei die Anfertigung von sogenannten "Thinking-aloud"-Protokollen(14), mit deren Hilfe die zugrundeliegenden Mechanismen der Problemlösung eruiert werden sollten. Die Arzt/Patient-Interaktion wurde simuliert, indem Beispielfälle als Grundlage der protokollierten Entscheidungsfindung dienten. Man nahm an, daß die Problemlösung in der Medizin grundsätzlich vergleichbar sei mit allgemeinen Problemlösungsmustern, d.h. eine Anwendung theoretischer Modelle zur Problemlösung möglich sein müßte. Dies ließ sich jedoch erst dadurch realisieren, daß man, wie oben bereits erwähnt, eine hypothesenbedingte Eingrenzung des offenen Problemraums annahm, der die Übertragung der "Means-ends-Heuristik" erlaubte; " the discrepancy between the present state and a number of possible goals is repeatedly evaluated" (15).

Während die Untersuchungen zur medizinischen Problemlösung in den USA oftmals von Psychologen, d.h. auf dem Hintergrund allgemeiner theoretischer Ansätze zur Problemlösung getätigt wurden, ist im deutschsprachigen Raum keine derart detaillierte Studie wie die von Elstein vorzufinden. Einzelaspekte, wie beispielsweise der für die Medizin typische Umgang mit unsicheren und unvollständigen Daten wurden beispielsweise von Scholz (16) untersucht, sie lassen sich jedoch nur schwer in ein Gesamtkonzept der medizinischen Problemlösung integrieren. Infolgedessen sollen im Folgenden die Studien aus dem amerikanischen Raum aufgrund ihrer soliderer Methodik die Basis der Darstellung bilden, wobei nicht verleugnet werden soll, daß die Anfertigung von Protokollen bereits methodische Fehler impliziert: "the very process of thinking aloud alters the content and process of thought" (17). Diese Untersuchungen werden ergänzt durch die eher abstrakt-theoretischen Beschreibungen, die sich in der medizinischen Fachliteratur des deutschsprachigen Raumes finden lassen und die Hinweise darauf bieten, daß der kognitionspsychologische Ansatz letztlich nicht ausreicht, die medizinische Diagnosefindung in allen Einzelaspekten zu beschreiben.

Die bisherigen Studien zur medizinischen Problemlösung lassen eine Unterteilung des Problemlösungsprozesses in folgende Stadien zu:

Datengewinnung (Anamnese und Befund)
Hypothesengenerierung
Dateninterpretation
Hypothesenevaluation

oen der Analyse dieser Stadien soll noch auf die Besonderheit und Bedeutung der Organisation dizinischen Wissens eingegangen werden.

2.2 Methodenprobleme

le bereits deutlich wurde, impliziert der kognitions- psychologische Ansatz, auf dessen Basis e umfangreichsten Studien zur medizinischen Problemlösung getätigt wurden, vor allem die fertigung von Verbalprotokollen über die mental ablaufenden Entscheidungsprozesse. Diese thode ist jedoch in mehrfacher Hinsicht problematisch. So weist Claparede (18) darauf hin, daß le Probanden oftmals während der entscheidenden und aktivsten Phasen des Problemlösungsprozes- s nicht reden, d.h. die interessantesten Momente der Entscheidungsfindung nicht verbalisiert rden. Neisser (19) nennt als weiteren Kritikpunkt die Tatsache, daß die verbale Schilderung ets sequentiell verläuft, obwohl man davon ausgehen muß, daß bei der menschlichen Problemlö- ng Operationen auf unterschiedlichen Gedankenebenen zur gleichen Zeit ablaufen ("multiple nkprozesse"(20)).

den Protokollen wird der Problemlösungsprozeß darüberhinaus oftmals weit geordneter und ringenter dargestellt, als er real abläuft; die diffusen, bewußtseinsmäßig kaum überblickbaren soziativen Verknüpfungen werden demnach in Protokollen eher unterdrückt(21) (22).

uzunehmen ist, daß die Verbalisierung des intern ablaufenden Entscheidungsprozesses zu einer gierung der als irrelevant eingestuften Momente führt, da Probanden sich sicherlich um eine ößtmögliche Stringenz ihrer Darstellung bemühen. Dabei muß die Tatsache berücksichtigt werden, uß unbewußt ablaufende Assoziationen für die Hypothesenbildung wie auch die Hypothesenmodifika- on von entscheidender Bedeutung sein können, jeoch nicht in Verbalprotokollen festgehalten rden, da diese Abläufe den Versuchspersonen nicht bewußt sind. Die oftmals vor allem in der -Forschung angeführte Analogie zwischen maschineller und menschlicher Entscheidungsfindung, ie ja oft unter dem Hinweis auf die Ergebnisse kognitionspsychologischer Untersuchungen rfolgt, bleibt demnach allein schon aus methodischen Gründen kritisch zu bewerten.

2.3 Wissensorganisation und Wissensabruf bei Medizinern

owohl die Begriffe Wissen und Denken nicht scharf differenziert werden, ist heute die Auffas- ung wohl allgemein, daß Wissen die Qualität des Denkens determiniert und Denken ohne Wissen icht vorstellbar ist; "even the idea that reasoning constitutes a form of knowledge has been ntertained"(23).

issen spielt für alle kognitiven Prozesse eine elementare Rolle. Das Wissen, das ein Individuum esitzt, beeinflußt grundlegende intellektuelle Fähigkeiten wie Induktionen, Analogien, Gruppie- ungs- und Abrufvorgänge und sogar die funktionalen Vorgänge im Kurzzeitgedächtnis. Wissen ist ntscheidend für die Schnelligkeit von Problemlösungsprozessen, für die Fähigkeit, auf der Basis nvollständiger Daten eine Aufgabe zu bewältigen und bietet überhaupt erst die Basis für die uordnung und Interpretation neuer Fakten. "Reasoning itself has been shown to be highly ependent on the indivual's knowledge base for the task environment in which the reasoning ccurs" (24). Rumelhart (25) zeigte in Untersuchungen, daß inhaltbezogene Informationen von robanden sehr viel eher und effizienter angewandt werden können als reine Formalismen, womit er ich mit einer Reihe anderer Forscher gegen die Annahme Piagets richtete (26), der von einer nhaltsunabhängigen reinen Denkstruktur ausgeht. Die Untersuchungen im Bereich der Kognitions- sychologie und die Ergebnisse der KI-Forschung erhärteten die Ansicht von Rumelhart und nderen, nach der für das menschliche Problemlösungsverhalten die Annahme von inhaltsunabhängi- en globalen Denkstrukturen nicht länger zu vertreten sei. Infolgedessen gewinnen Untersuchungen ur Verankerung und Organisation von Wissen im menschlichen Gehirn eine immer größere Bedeutung. m Folgenden werden einige Annahmen und Erkenntnisse zur Verankerung medizinischen Wissens im enschlichen Gedächtnis dargestellt, wobei die Gegenüberstellung zur Wissensrepräsentation in edizinischen Expertensystemen nur dort erfolgen wird, wo sich diese dem Leser nicht unmittelbar ufdrängt.

Die Basis ärztlicher Kompetenz liegt ausser in dem allgemein zugänglichen Wissen in der angesammelten eigenen Erfahrung, "a sufficiently broad experience with related problems to permit the determination of which information is pertinent, which clinical findings are to be integrated into appropriate hypotheses and conclusions" (27). Die Existenz umfangreichen Wissens und die Fähigkeit, dieses Wissen problemadäquat einzusetzen, d.h. Bezüge zwischen abstraktem Wissen, Erfahrungen und aktuellen Situationen herzustellen, stellt ein wesentliches Kriterium für medizinische Expertise dar. Besonders bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die Untersuchungsergebnisse von Chi, Glaser und Feltovich(29) sowie von Elstein (30), bei denen sich übereinstimmend ergab, daß Unterschiede zwischen Anfängern und Erfahrenen nicht auf besseren Problemlösungsmethoden, sondern auf dem unterschiedlichen Umfang an Wissen und Erfahrung basieren. Diese Ergebnisse führten zu der Überzeugung, "that clinical reasoning is not a general skill, but rather a process that is strongly dependent on the contents of knowledge to which it is applied" (31).

Untersuchungen zur internen Repräsentation von Wissen bei Experten weisen auf eine hierarchische Verankerung von Krankheitsmodellen hin. Diese beinhalten sowohl die pathophysiologischen Bedingungen von Erkrankungen als auch deren klinische Manifestationen. Globale Krankheitskategorien bilden den Gipfel der Hierarchien, während die speziellen Ausprägungen von Einzelerkrankungen die Wurzel der hierarchischen Strukturen bilden. Gomez und Chandrasekavan (32) sind ebenfalls von einer hierarchischen Strukturierung des medizinischen Wissens überzeugt. Sie vertreten die Auffassung, daß diese Hierarchien aufgegliedert seien in Krankheitskonzepte, die kausal miteinander verknüpft sind. Die Benutzung des Wissens in problemadäquater Form wird hier ebenso zur Expertise gezählt wie die Verankerung umfangreicher Faktenkenntnis, wobei hier eine getrennte Betrachtung von Repräsentationsstrukturen und der Benutzung von Wissen vorgenommen wird, eine Vorstellung, die erkenntnistheoretische Fragen aufwirft(33). Nach Dahmer (34) ist die Repräsentation einer Erkrankung gleichzusetzen mit einer Abstraktion des Krankheitsbildes, das weniger eine Summation von Symptomen beinhaltet als vielmehr das Gesamtgefüge eines Krankheitsprozesses, den Stellenwert der Einzelsymptome und ihre zeitliche Dynamik umfaßt. "An einem Krankheitsbild sind also neben den Einzelsymptomen das Wie, das Warum, das Zueinander und schließlich auch das zeitliche Nebeneinander der Krankheitszeichen von Bedeutung" (35). Hervorgehoben wird hier - auch in Gegenüberstellung zur maschinellen Darstellung medizinischen Wissens - die Repräsentation der zeitabhängigen Verschiebung von Symptomen- konstellationen, d.h. die innere Dynamik eines Krankheitsprozesses, die eine Krankheit als prozessurales Gefüge kennzeichnet. Gegenüber dem Anfängerwissen zeichnet sich nach Auffassung der Gruppe um Feltovich (36) das Expertenwissen durch eine weitverzeigte Vernetzung der Krankheitsbilder untereinander auf, so daß spontane Assoziationsketten gebildet werden können in Abhängigkeit zu vorgefundenen Symptomen und generierten Hypothesen. Ebenso umfaßt medizinisches Wissen die Fähigkeit, aufgrund von Erfahrungen einschätzen zu können, ob eine aufgetretene Symptomatik noch innerhalb der Streuung eines krankheitsspezifischen Clusters von klinischen Zeichen liegt.

Ein weiteres Charakteristikum medizinischen Expertenwissens ist die Fähigkeit zur Verknüpfung der abstrakten, aus Textbüchern erworbenen Krankheitsmodelle mit den konkreten Erfahrungen, die ein Mediziner im Laufe seiner Berufstätigkeit mit der jeweiligen Erkrankung gemacht hat. Medizinisches Wissen ist somit eine Koppelung abstrakter Kategorien mit konkreten Ereignissen, d.h. eine Synthese von semantischem und episodischem Wissen, das als Basis für die schnelle Hypothesenbildung zu begreifen ist, die sich als Folge des unmittelbaren ersten Gesamteindrucks ergibt. Die im Gedächtnis verankerten Krankheitsmodelle sind damit eine verwobene Struktur von theoretisch erlerntem Wissen und individuell vollzogener Erfahrung. Mithilfe derartiger Kenntnisse über Krankheiten können sowohl Generalisierungen als auch Diskriminationen von Krankheiten vorgenommen werden.

Die Repräsentation medizinischen Wissens beim Menschen unterscheidet sich demnach in einigen wesentlichen Punkten von der maschinellen Wissensdarstellung, die als Hinweis für die eingeschränkte Leistungsfähigkeit von Computerprogrammen gegenüber der menschlichen Kompetenz begriffen werden können. Im menschlichen Wissen sind umfangreiche und differenzierte Krankheitskollektive im Gedächtnis verankert, die eine weit verzweigte Vernetzung aufweisen. "Concurrently with the addition of disease models to memory, there is an embellishment of the compositional features of a disease that are encoded in each disease model" (37). Experten verfügen demnach über das Wissen genauer Einzelheiten und charakteristischer Besonderheiten einer Erkrankungen; sie sind dazu in der Lage, Untertypen einer Erkrankung zu diskriminieren und Varianten eines Krankheitstyps zu erkennen. Neben den Modellen über Krankheiten sind Pläne und typische Aktionsabläufe im Gedächtnis verankert(38), die eine stringente Überprüfung der Diagnosehypothesen ermöglichen.

nzeichnend für die Wissensorganisation von Medizinern ist darüberhinaus die Verankerung mporaler und kausaler Zusammenhänge. Die Verknüpfung von abstrakten Modellen mit konkreten fahrungen und die Integration von Alltagswissen durch die weitverzweigte Vernetzung des nschlichen Gedächtnisses sind weitere Besonderheiten medizinischen Wissens. Durch die unterhiedlichen internen Repräsentationen eines Krankheitsbildes, seien es bildliche Vorstellungen, nsorische Erinnerungen, abstrakte Krankheitsmodelle oder episodische Engramme, ist dem nschlichen Experten ein dauernder Wechsel des Blickwinkels durch die vielgestaltige Repräsentionsform im menschlichen Gedächtnis möglich.

den hier zitierten Studien, die keinen Anspruch darauf erheben, eine Modellbildung über die rankerung medizinischen Wissens vorzunehmen, sondern lediglich Annahmen und Hypothesen züglich der Strukturen medizinischer Expertise im menschlichen Gedächtnis formulieren, werden rstellungen nicht explizit erwähnt. Obwohl die Kognitionspsychologie erkannte, daß Vorstellun-n, d.h. analoge Wissensrepräsentationen, wesentliche Bestandtteile des menschlichen Gedächtsses sind(39), werden diese von den oben zitierten Autoren nicht berücksichtigt. Bedenkt man doch die Relevanz, die sensorische Erinnerungen sowie der erste Gesamteindruck eines Patienten r die Diagnosefindung, insbesondere die frühe Hypothesenbildung haben, und berücksichtigt dem die Bedeutung von konkreten Erfahrungen, die ja auch analoge Vorstellungen beinhalten, nn scheint diese Nichtbeachtung mit ein wesentlicher Grund für jene Defizite zu sein, die mputerwissensbasen gegenüber dem menschlichen Gedächtnis aufweisen.

rkannt wird indes die Bedeutung, die das Alltags- oder Allgemeinwissen, beispielsweise das issen über Lebensgewohnheiten und soziale Bedingungen von Bevölkerung- oder Berufsgruppen, für ie Diagnosefindung hat (40). Die Reduktion der Wissensbasen medizinischer Expertensysteme auf as fachspezifische Wissen ist eine weitere Ursache für die Mängel, die gegenwärtige Systeme ufweisen, greift doch der Mensch bei jeder noch so fachgebunden scheinenden Problemlösung auf enes Alltagsverständnis oftmals unbewußt zurück.

esümierend kann festgehalten werden, daß Studien über die Form der Wissensrepräsentation von edizinern kaum fundierte Resultate hervorbrachten, so daß man bislang nicht dazu in der Lage st, ein theoretisches Modell der Verankerung medizinischen Wissens zu entwerfen. Man ist daher enötigt, auf allgemeine Untersuchungen zur Wissensrepräsentation beim Menschen zurückzugreifen zw. sich auf die hier aufgeführten Annahmen zu stützen. Betont werden soll jedoch die bei allen utoren gefundene Erkenntnis, daß für die Ausprägung von medizinischer Expertise weniger enerelle Lösungsmechanismen entscheidend sind als vielmehr Umfang, Strukturierung und Vernetung des Wissens. Damit wird offenbar, daß für medizinische Problemlösungen der Umfang und die rt der Organisation von Wissen von fundamentaler Bedeutung sind für die Güte der erzielten esultate.

3.4 Der ärztliche Diagnoseprozess

3.4.1 Allgemeines zur Diagnosefindung

Die Diagnosefindung wird allgemein als die Basis ärztlichen Handelns angesehen. In der griechischen Ursprungsbedeutung wird Diagnose mit Entscheidung gleichgesetzt. Heutige Definitionsversuche sind weitergefaßt; so wird die Diagnose bei Hegglin und Siegenthaler (41), umschrieben mit den Verben "untersuchen, genau überlegen, unterscheiden, deutlich kennenlernen, sich entschließen, beschließen". Der Pschyrembel, das allgemein verbreitete Wörterbuch der Medizin, setzt Diagnose gleich mit "Erkennen und Benennung d. Krankheit" (42), wobei die Differentialdiagnose demgegenüber in der Unterscheidung ähnlicher Krankheitsbilder bestehe. Die vergleichbare amerikanische Quelle, Webster's New Collegiate Dictionary, sieht die Diagnose als "the investigation or analysis of the cause or nature of a condition ... or problem" (43).

Hegglin und Siegenthaler(44) sehen die Diagnose eines Arztes als Geschehen, daß nach den Regeln der Logik abläuft. Sie begründen ihre Annahme damit, daß das Prinzip der Induktion durch den Schluß vom Speziellen (dem individuellen Patienten) auf das Allgemeine (Krankheitseinheiten) gewährleistet sei. Die Diagnostik ist in ihren Augen dennoch kein rein formaler Vorgang, sondern an das handelnde Subjekt gebunden. "Induktive Schlüsse sind ein subjektives geistiges Geschehen und damit an die Person des Diagnostikers gebunden"(45). Dies wird zum Beispiel offenbar, wenn die patientenspezifische Bedeutung von Symptomen beurteilt werden muß, d.h. abgewogen wird, welchen Stellenwert die geschilderte Symptomatik im individuellen Fall hat. "Dem Arzt muß es aber stets bewußt bleiben, daß das Erleben einer Krankheit einseitig unvollständig und lebensarm bleibt, wenn die Krankheitssymptome losgelöst vom kranken Menschen beachtet werden" (46).

Diagnosefindung umfaßt demnach nicht nur die Fähigkeit, auf der Basis des medizinischen Wissens folgerichtige Schlüsse ziehen zu können, sondern impliziert darüberhinaus Verständnis für die körperlichen und psychischen Zusammenhänge von Krankheiten, die von Patient zu Patient unterschiedlich und wesentlich sind für die individualspezifische Krankheitsgestaltung; "wie eine seine Krankheit trägt, empfindet und sich mit ihr auseinandersetzt - was große Auswirkungen auf die Symptomatologie hat -, ist nur zu verstehen, wenn man um die persönliche Krankheitsgestaltung weiß." (47). Weiter zählt zu den diagnostischen Kompetenzen die Fähigkeit, Krankheitsmodelle, die ja lediglich statistische Mittelwerte von spezifischen Erkrankungen und Symptomkonstellationen darstellen, auf die individuell abweichenden Symptomen-Cluster eines Patienten zu übertragen. Darüberhinaus bedarf die Diagnosefindung einer Synthese zwischen einer naturwissenschaftlichen und einer hermeneutischen, d.h. den individuellen Patienten verstehenden Zugangsweise.

Die Diagnose ist also eine subjektgebundene schöpferische Leistung. Sie besteht zunächst darin, daß der Diagnostiker auf der Grundlage seines ersten Eindrucks und der Primärsymptomatik Hypothesen bildet, die im Zuge weiterer Befunderhebung und Datengewinnung überprüft werden. Übereinstimmung herrscht bei nahezu allen Autoren darüber, daß der Prozeß der Diagnosefindung zumindest seine naturwissenschaftliche Komponente, als hypothetisch-deduktiver Prozeß zu bezeichnen ist. Auf der Basis früh gebildeter Hypothesen erfolgt deren Überprüfung durch deduktive Schlußfolgerungen, die auf der Basis der aktuellen Patientendaten und des ärztlichen Wissens vollzogen werden können. "Diagnostic problems are solved by a hypothetico-deductive method" (48).

Unterschiedliche Konzepte existieren über die Art der Hypothesenbildung. Während Weed (49) annahm, daß der Diagnostiker erst auf der Basis umfangreichen Datenmaterials Hypothesen über eine mögliche Diagnose generiert, gehen Morgan et al. (50) und Elstein et al. (51) von einer frühen, d.h. auf wenigen Daten basierenden Hypothesenbildung aus, deren Modifikation durch die Gewinnung weiterer Daten erfolgt. Insgesamt gesehen wird allgemein von einer frühen Hypothesenbildung ausgegangen, die bereits nach den ersten Eindrücken und wenigen geschilderten Symptomen erfolgt.

Dahmer bezeichnet die Diagnose als Denkprozeß, in dessen Verlauf ein Zusammenhang hergestellt wird zwischen Symptom und Diagnose. Er schlägt ein formales System zur Charakterisierung dieses Prozesses vor, das er in Form eines Flußdiagrammes zur Illustration des Entscheidungsvorgangs darstellt: Ausgehend von den Primärsymptomen erfolgt zunächst ein vorsichtiges "Abwägen" (53) der Bedeutung, die das Einzelsymptom und die erhobenen Befunde für die Diagnose haben. So entsteht eine individualspezifische Symptomenkonstellation, auf deren Basis die "Zuordnung" (54) zu bestimmten Krankheitsmustern erfolgt. Diese Zuordnung kann nach logischen Regeln oder aber durch Intuition erfolgen, entscheidend ist die Gegenüberstellung des erworbenen Wissens mit dem konkreten Fall und die differentialdiagnostische Berücksichtigung ähnlicher Krankheitsbilder. Dahmer (55) betrachtet die nosologische Differentialdiagnostik als den Prozeß, bei dem ein Vergleich erfolgt zwischen einem als wahrscheinlich eingeschätzten Krankheitsbild mit ähnlichen Erkrankungen. Entscheidend ist dabei die Differenzierung zwischen einem Individualfall, d.h. der Erkrankung eines konkreten Patienten, und den idealisierten Krankheitsbildern, wie sie gelernt und anfänglich auch im Gedächtnis gespeichert wurden.

Bemerkenswert ist dabei die Begriffswahl, die Dahmer(56) vornimmt. So werden mit den Begriffen "Abwägen" und "Intuition" andere als rein formale Erkenntnisformen in den Diagnoseprozeß integriert, d. h. es wird hier eine Form von Denken als wesentlich für den Diagnoseprozeß betrachtet, die jenseits formaler Vorgehensweisen liegt und das subjektive Erkenntnisvermögen betrifft. "Ärztliche Intuition heißt Krankheiten ohne analytische Denkprozesse zu diagnostizieren"(57). Für den Diagnoseprozeß ist demnach neben der logischen Vorgehensweise ebenso entscheidend die unmittelbare, auf Eingebung basierende Verbindung zwischen einem aktuellen Fall und den eigenen Erfahrungen mit bekannten Krankheitsbildern.

Dahmer (58) vergleicht darüberhinaus den konkreten Diagnoseprozeß mit einem empirischen Forschungsvorgang, indem nach Sammlung von Informationen Hypothesen gebildet und diese dann im Verlauf weiterer Datengewinnung verifiziert oder falsifiziert werden. Gemäß den Popper'schen Kriterien (59) fordert Dahmer (60), die Widerlegung der gebildeten Hypothesen während des Problemlösungsprozesses anzustreben, statt nach bestätigenden Daten zu suchen, wie es zumeist in der Praxis geschieht(61), wo die Diagnosefindung oftmals gleichgesetzt werden kann mit einem "Fahnden nach Beweisen" für eine generierte Hypothese.

on Elstein (62) durchgeführte Untersuchungen zur Relevanz von Heuristiken für den Diagnoseproeß ergaben, daß sie, d.h. Faustregeln zum problemadäquaten Umgang mit Wissen, eine eher kundäre Rolle im medizinischen Entscheidungsprozeß spielen gegenüber dem Wissen über Krankeitsprozesse. Die Versuchspersonen weisen eine große Variationsbreite an angewandten Heuristien auf, so daß sich standardisierte Muster kaum feststellen lassen. Relevanter für den Entcheidungsprozeß war durchgängig die Organisation und Vernetzung medizinischen Wissens; "the olving of medical problems requires an adequate understanding of specific disease processes and heir manifestations" (63). Für diese assoziative Verknüpfung aktueller Daten mit Informationen us dem Gedächtnis ist oftmals weniger eine logisch-deduktive Denkweise vonnöten als vielmehr ine intuitive Verbindung konkreter Wahrnehmungen mit früheren Erfahrungen.

ie medizinische Diagnosefindung zeichnet sich demnach generell durch zwei unterschiedliche orgehensweisen aus:

- dem Vorgehen nach logischen Regeln, d.h. der hypothetisch-deduktiven Methode;
- der Intuition, d.h. der nicht formalen, assoziativen Verknüpfung aktueller Erscheinugen mit Wissen und subjektiven Erfahrungen.

ährend die streng logische Vorgehensweise formalisierbar ist, wiedersetzt sich die Intuition umeist bereits der Verbalisierung. "Die Intuition hängt weitgehend von subjektiven Faktoren ab, esonders vom Wissensschatz des Arztes und seiner Fähigkeit, dieses Wissen auf den individuellen all anzuwenden. Bei der nur logischen Analyse werden unter Umständen während der Untersuchung nterbewußt aufgenommene Informationen vernachlässigt und damit bleibt viel Unwägbares von dem rkenntnisprozeß, der zur Diagnose führt, ausgeschlossen." (64).

en unterschiedlichen Methoden bei der Diagnosefindung entsprechen zwei differente Diagnostikormen: die phänomenologische, d.h. ganzheitliche, auf dem Gesamteindruck von einem Patienten asierende Vorgehensweise, die zu den oftmals unbewußten Assoziationen führt, und die nosologiche Diagnostik, bei der ein deduktiver Vergleich vorgenommen wird zwischen dem Aktualzustand ines Patienten und den Krankheitsbildern im Gedächtnis. Die hier voneinander getrennten iagnoseformen sollten im Idealfall gekoppelt sein, so daß eine Synthese denkbar ist von anzheitlicher und partikularer Betrachtung des Krankheitsgeschehen, die sich methodisch in einer Verknüpfung intuitiver und logischer Erkenntnisformen widerspiegeln könnte.

3.4.2 Datengewinnung/Anamneseerhebung

Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, stellt die Datengewinnung im Bereich der Medizin einen fundamentalen Bestandteil des Problemlösungsprozesses dar. Eine qualifizierte Anamneseerhebung wird demnach als Basis für die ärztliche Entscheidungsfindung angesehen, sie erfordert "umfangreiches Wissen, viel Erfahrung und eine gute Portion Routine"(65). Zu beachten sind dabei folgende Punkte:

- die Möglichkeit für den Patienten, seine Beschwerden in freier, unstrukturierter Form zu schildern;
- die Beachtung subjektiver Faktoren, die Einschätzung der Persönlichkeitsstruktur eines Patienten;
- die präzise und umfassende Datenerhebung. (66)

Eine Schematisierung oder gar Delegation der Anamnesetätigkeit an andere Personen oder gar Computer wird überwiegend abgelehnt. So heben Hegglin und Siegenthaler(67) hervor, daß "die entscheidenden Feinheiten...nur durch dem Kranken individuell angepaßtes Befragen herausgehoben werden" können(68). Neben den allgemeinen anamnestischen Daten, der Befunderhebung und der Ermittlung der Symptomatik spielt damit die Lebensgeschichte eine elementare Rolle für die anamnestische Einschätzung der Symptomatik eines Patienten. Zur individualspezifischen Einordnung der erhobenen Daten ist nicht nur eine einfühlende Haltung des Arztes erforderlich, vielmehr kann diese nur erfolgen durch den Rückgriff auf die Fülle an Alltagserfahrung, die dem Diagnostiker eine entsprechende Einschätzung erst ermöglicht. "Es gibt Krankheiten und es gibt kranke Menschen. Krankheiten werden mit technischen Hilfsmethoden diagnostiziert, kranke Menschen mit der Intuition"(69). Erst durch das intuitive Gespür, das Grundlage jeder guten Anamnese ist, vermag der Arzt somit ein Bild vom Wesen einer Erkrankung gewinnen. Dabei dienen ihm äquivalente Erfahrungen ebenso wie sein allgemeines Wissen über Lebenszusammenhänge und psychosoziale Situationen.

Die ausschließliche Orientierung an der isoliert betrachteten körperlichen Symptomatik wird also übereinstimmend als nicht hinreichend begriffen, um eine Krankheitsdiagnose stellen zu können. Ein Vertrauensverhältnis zwischen Arzt und Patient bildet erst die Basis einer umfassenden Einschätzung des körperlichen Geschehens(70), das ja oftmals nicht auf rein somatische Ursachen zurückgeführt werden kann. Vielmehr bedarf es ebenso der Beurteilung der psychischen und den sozialen Bedingungen, in denen ein Patient sich befindet, um die Erkrankung in ihrer ganzen Bandbreite erfassen zu können.

Wesentlich ist zudem die Fähigkeit eines Arztes, verdeckte, tatsächliche Beschwerden hinter einer vordergründigen Symptomatik zu erkennen. Dies impliziert die Ermittlung scheinbar unwichtiger klinischer Zeichen, die oftmals eher intuitiv und mit Gespür als auf kausal-deduktivem Wege erfaßt werden können. Ebenso kann erst eine langjährige Erfahrung im Umgang mit Patienten zur Kenntnis darüber führen, wie die Schilderungen eines Patienten zu interpretieren sind. Kommunikatives Erleben, wie es der Mensch ja in seiner ontogenetischen Entwicklung erfährt, ist damit ebenso relevant für die Diagnosefindung, weil erst auf dieser Grundlage eine patientenorientierte Bewertung der körperlichen Symptomatik erfolgen kann. Die Berücksichtigung der lebensgeschichtlichen Situation eines Patienten, wie sie beispielsweise in der von Viefhues und anderen entwickelten Sozialanamnese erfolgt(71), ermöglicht den subjektbezogenen Zugang zu einer Krankheit, bei dem Krankheit nicht ausschließlich als abstrakte naturwissenschaftliche Größe, sondern ebenso als individuelles Geschehen verstanden wird.

Um eine patientenorientierte Datenerhebung durchführen zu können, bedarf es demnach umfangreichen Wissens, das über das reine Fachwissen hinausgeht: Wissen über soziale und psychische Zusammenhänge, Wissen über gesellschaftliche Bedingungen, Wissen über psychophysische Wechselwirkungen, letztlich eben jenes
Wissen über die Welt, welches der Mensch in seiner täglichen
Praxis, in der kontinuierlichen Interaktion mit seiner Umwelt
erwirbt und das einem steten Veränderungsprozeß unterworfen ist.

Betrachtet man diese Voraussetzungen unter dem Blickwinkel einer angestrebten maschinellen Anamneseerhebung, wie sie ja bereits partikular praktiziert wird(72), so werden die Grenzen einer derartigen Vorgehensweise rasch offenbar. Expertensysteme sind in Ermangelung dieser Bedingungen nicht dazu in der Lage, das Wesen einer Erkrankung und ihre möglichen tieferen Ursachen erfassen zu können.

8.4.3 Hypothesengenerierung und -überprüfung

Bereits der erste Eindruck und die Primärsymptomatik eines Patienten führen zu einer frühen Hypothesenbildung "via an associative process that links cues to content stored in memory" (74). Man nimmt an, daß diese Vorab-Diagnosen auf einer eher assoziativen als stringenten Koppelung der klinischen Zeichen mit den im Langzeitgedächtnis verankerten Krankheitsbildern basieren, aber auch zurückzuführen sind auf konkrete, episodische oder vorstellungsmäßige Erfahrungen.

Die Hypothesen beziehen sich dabei vorwiegend auf Krankheiten mit großer relativer Häufigkeit, Krankheiten mit einem hohen Risiko und Krankheiten mit hervorstechenden Leitsymptomen. Konkurrierende Hypothesen - die Langzeitstudie von Elstein (75) ergab eine gleichzeitige Bildung mehrerer Hypothesen - ermöglichen zudem Assoziationsketten zu weiteren Diagnosen. Der sich anschließende Problemlösungsprozeß zielt auf die Verifikation der als am wahrscheinlichsten erachteten Hypothese, indem hypothetische Cluster von Symptomen gebildet werden, die den jeweiligen Annahmen entsprechen. Untersuchungen (76) ergaben, daß widersprüchliche Symptome, d.h. Symptome, die sich nicht in ein gemeinsames krankheitsspezifisches Cluster integrieren lassen, sondern widerprüchliche Konstellationen implizieren, nicht zur Bildung einer größeren Anzahl von Hypothesen führten. Isolierte Zeichen finden demnach weniger Beachtung als Symptomen-Cluster, weil diese der Repräsentation von Krankheitskategorien im Gedächtnis zu entsprechen scheinen; "a generally safe and useful medical heuristic would be to ignore isolated cues and trace only the causes of clusters of cues" (77). Durch die Orientierung an Clustern und die Nichtbeachtung einzelner, inkonsistenter Symptome werden unnötige und zeitaufwendige Merkmalsvergleiche vermieden, wenn so auch das Risiko eingegangen wird, ein relevantes, widersprechendes Symptom zu übersehen und damit einer falschen Hypothese zu lange verhaftet zu bleiben. "Departures from textbook descriptions were treated as irrelevant noise rather than a signal", (78).

Die verschiedenen Untersuchungen (79) ließen keine genaue Klärung der Frage zu, ob die Primärhy-

thesen relativ global gefaßt sind und eine zunehmende Spezifizierung erfahren oder ob bereits
t hoc spezielle Hypothesen auf der Basis herausragender, signifikanter Symptome gebildet
rden. Während also Unklarheiten existieren über den Spezialisierungsgrad der Primärhypothesen,
lt man allgemein die frühe, auf wenigen Daten basierende Hypothesengenerierung für ein
sichertes Charakteristikum der medizinischen Problemlösung, wobei als deren Grundlage eher ein
ssoziativer Prozeß angenommen wird als eine selektive Suche nach größtmöglichen Übereinstimmun-
n von Daten und Clustern. Man geht davon aus (80), daß die begrenzte Hirnkapazität des
nschen Ursache dafür ist, daß selten mehr als fünf Hypothesen parallel überprüft werden; d.h.
ypotheses serve as organizing rules in working memory" (81).

e unmittelbare Hypothesenbildung impliziert eine direkte Einschränkung der zu erfragenden
ten eines Patienten und grenzt damit die Zahl möglicher Diagnosen sofort drastisch ein. Der
oblemlösungsvorgang wird somit reduziert auf die Überprüfung der in Frage kommenenden Krank-
itsbilder, der ursprünglich offene Problemraum also eingegrenzt. Die infolge dieser direkten
pothesenbildung stattfindende weitere Datengewinnung erfolgt selektiv, d.h. findet insofern
elgerichtet statt, als sie auf die Verifikation der wahrscheinlichsten Hypothese ausgerichtet
st. Ebenso wird die Interpretation von klinischen Zeichen unter der Perspektive der generierten
pothesen durchgeführt, was oftmals zu Fehlern führt, die darin begründet liegen, daß Symptome
berbewertet werden oder unbeachtet bleiben, um eine als wahrscheinlich eingestufte Hypothese
eibehalten zu können. Die Präzision und Ausführlichkeit der Datengewinnung ist für den Prozeß
r Diagnosefindung damit ebenso entscheidend wie die Genauigkeit der Dateninterpretation.
ährend jedoch der Vorgang der Datengewinnung, d.h. Anamnese und Befund, zumeist bewußt statt-
indet, erfolgen das Abwägen und die Interpretation der ermittelten Symptome häufig unbewußt, so
ass sie der direkten Erforschung oftmals nicht zugänglich sind. Bislang existieren keine
inreichenden Studien darüber, wie der Interpretationsprozeß abläuft, d.h. wie die Organisation
es medizinischen Wissens im Gedächtnis und der Abruf wesentlicher Informationen erfolgt. "To
peculate momentarily, the process may involve retrieval of lists of features from memory, each
ist being nested under a hypothesis and then a comparison of the findings in a case with the
xpectancies implied by these lists" (82). Die in der KI- Forschung vertretene Annahme, daß sich
er Interpretationsprozeß mit einer einfachen Vergleichsprozedur ausreichend beschreiben lasse,
rwies sich als zu begrenzt; "passive template matching has been shown to be an insufficient
ccount even of simpler perceptual processes" (83).

isla ng konnten bei der Evaluation von Hypothesen zwei globale Modelle der diagnostischen
rteilsfindung unterschieden werden, die jedoch weder die Komplexität der Problemstellung noch
ie unbewußt ablaufenden Prozesse ausreichend berücksichtigen:

- Selektion der Hypothese mit einem Maximum an
  übereinstimmenden Symptomen mit den aktuellen Daten;
- Selektion der Hypothese mit der größten Diskrepanz zwischen übereinstimmenden und
  widersprechenden klinischen Zeichen.

nsgesamt stellt man fest, daß die Integration und Kombination von Symptomen sowie die assozia-
ive Koppelung von Krankheitsbild und Erfahrungen relevanter für eine korrekte Lösungsfindung
ind als eine bis ins letzte Detail gehende Datengewinnung. Dies läßt darauf schließen, daß der
nterpretation der ermittelten Symptomatik die eigentliche Bedeutung im Diagnoseprozeß zukommt,
obei dieser Bewertungsvorgang auf deduktivem und intuitivem Weg erfolgen kann.

lstein (84) entwarf als Folge verschiedener Untersuchungen zwei abstrakte Modelle, die seiner
uffassung nach den medizinischen Problemösungsprozeß hinreichend charakterisierten:

1. - Wahrnehmung primärer konsistenter Zeichen,
   - Primäre Hypothesenbildung
   - Sekundäre konsistente Symptome
   - Spezifizierung und Verfeinerung der Primärhypothese, der ursprünglich gebildete
     Problemraum bleibt erhalten.
2. - Wahrnehmung primärer Symptome
   - Primäre Hypothesenbildung
   - sekundäre widersprüchliche Zeichen
   - Bildung einer neuen Hypothese, es erfolgt eine Restrukturierung des Problemraums

Beide Modelle beziehen sich lediglich auf das hypothetisch-deduktive Vorgehen, nicht jedoch auf
ie assoziative, phänomenologische oder intuitive Form der Problembewältigung. So wird hier

lediglich die Tatsache berücksichtigt, daß ein Vergleich zwischen aktueller Symptomatik und Symptomen-Kollektiven im Gedächtnis stattfindet, obwohl selbst Elstein immer wieder darauf hinweist, daß die Zuordnung der klinischen Zeichen eines Patienten zu Engrammen im Gedächtnis weniger stringent als vielmehr durch die probierende Verknüpfung von Krankheitsbildern, Vorstellungen und Erfahrungen erfolgt. Elstein und andere ziehen aus ihren Untersuchungen selbst den Schluß, "that the physician's information-processing activity during the early part of the workup consists primarily in associative retrieval of problem-formulation labels on the basis of cues, and that this process is mediated to only a limited extent by search strategies"(85).

Weitere Studien (86) untersuchten diese erste Phase des Problemlösungsprozesses noch genauer. Dabei ergab sich, daß die mentale Repräsentation bei der Hypothesenbildung vorwiegend verbal, weniger bildlich stattfindet. Ärzte richten demnach ihr Augenmerk vor allem auf verbal geäußerte sowie verbal erfaßbare klinische Zeichen. Dieses Untersuchungsergebnis ist jedoch schon insofern problematisch, als sowohl die Protokolle wie auch die Befragungen stets auf verbalen Beschreibungen basieren, somit also notwendigerweise sensorische Eindrücke in der Darstellung eine geringere Rolle spielen. Darüberhinaus erwies sich auch in den Studien der Gruppe um Elstein der primäre klinische "Gesamteindruck", der wohl im wesentlichen auf ungerichteten Wahrnehmungen fundiert, als äußerst relevant. "One major use of such cues, consistently reported by over half of the physicians, is to form a general impression of the patient that will aid in judging the accuracy and objectivity of the cues reported verbally by the patient" (87). Damit wird deutlich, daß der medizinische Problemlösungsprozeß nicht reduziert werden kann auf einen Merkmalsvergleich einzelner Symptomencluster, sondern daß der ganzheitlichen Wahrnehmung eines Patienten, dessen körperliche Symptomatik im Gesamtgefüge seiner Lebensumstände gesehen werden sollte, ein hoher Stellenwert für die Güte einer Diagnosefindung zukommt. Resümierend können die Ergebnisse der Untersuchungen zur medizinischen Hypothesenbildung wie folgt festgehalten werden:

- eine frühe, d.h. auf wenigen Daten basierende Hypothesenbildung scheint typisch für die medizinische Problemlösung zu sein;
- die vorfindbaren klinischen Symptome werden für die Hypothesenbildung gruppiert;
- der Clusterbildung widerprechende Symptome werden zunächst ignoriert;
- die sekundären Hypothesen sind zumeist Spezifikationen der Primärhypothesen, nur selten jedoch neue Alternativen;
- die Hypothesen dienen der Organisation des menschlichen Gedächtnisses, der Eingrenzung der zu erfragenden Daten und der Strukturierung des Problemfeldes;
- der erste Gesamteindruck stellt bereits eine Einschränkung der möglichen Hypothesen dar, er ist entscheidend für die Interpretation der patientenspezifischen Symptomatik;
- der Prozess der Problemformulierung und -lösung scheint eher ein Vorgang der assoziativen Koppelung aktueller Symptomatik mit abstrakten Krankheitsmodellen, Vorstellungen und konkret erlebten Erfahrungen zu sein als eine strategisch gesteuerte Suche oder ein Vergleichsprozeß;
- die Interpretation der Symptomatik ist nicht nur ein hypothetisch-deduktiver Vorgang, sondern ebensosehr ein auf Intuition und phänomenologischer Zugangsweise basierender Prozeß.

Damit wird deutlich, daß die Hypothesengenerierung und -überprüfung ein komplexer Vorgang ist, der sich nicht ausschließlich zurückführen läßt auf deduktive Ableitungen, determinierte Regelanwendungen, Such- und Vergleichsprozeduren. Vielmehr muß der assoziativen Verknüpfung, der Intuition, wie auch der phänomenologischen, ganzheitlichen Betrachtung eine ebenso relevante Rolle im medizinischen Entscheidungsprozeß zugesprochen werden. Dies bedeutet jedoch, daß eine maschinelle Abbildung der Diagnosefindung immer nur unvollständig realisiert werden kann, da die nichtformalisierbaren oder nicht ausreichend strukturierbaren Momente des Problemlösungsprozesses in ein Computerprogramm zumindest bislang nicht integrierbar sind.

8.4.4 Hermeneutischer Zugang

Bereits ersichtlich wurde, daß sich die ärztliche Diagnosetätigkeit nicht reduzieren läßt auf eine rein naturwissenschaftliche, d.h. hypothetisch- deduktive Methode. So zählt ebenso zur Kompetenz eines Mediziners die Fähigkeit, in der gesamten Erscheinung eines Patienten eine Krankheit zu erspüren bzw. diese als individualspezifisches Geschehen zu begreifen. So stellt die verstehende Haltung des Arztes eine wesentliche Grundlage einer erfolgreichen Anamnese- und damit auch Diagnosefindung dar. Erst die Synthese einer gesetzmäßigen, abstrahierenden Methode und einer einfühlenden, auf das konkrete Subjekt bezogenen Vorgehensweise gestaltet den medizinischen Problemlösungsvorgang zur sogenannten "ärztlichen Kunst".

uch für die Therapieplanung, eine Aufgabe, die ebenfalls von Expertensystemen wie MYCIN bernommen werden soll, ist die Miteinbeziehung psychologischer Zugangsweisen(88) von zentraler edeutung ('objektiv bessere' Therapieformen können für einen Patienten aus vielschichtigen ründen so belastend sein, daß eine Behandlungweise 'zweiter Wahl' unter Umständen deutliche orteile bietet; sehr scharf zu Tage tritt dies z.B. bei den Alternativen Operation, Bestrahlung nd Chemotherapie im Rahmen der Behandlung eines Karzinoms.). Wenn diese Zugangsweise hier auch ls psychologische bezeichnet wird, so stellt sie bei näherer Betrachtung doch nichts qualitativ nderes dar als das oben beschriebene hermeneutische Verfahren. Die in Expertensystemen notwenige alleinige Berücksichtigung der naturwissenschaftlichen Methode birgt wissenschaftstheoretiche Implikationen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

3.5 Wissenschaftstheoretische Implikationen

er Konzeption von Expertensystemen liegt notwendigerweise eine naturwissenschaftliche Sichteise der Medizin zugrunde. Die hier verankerten Methoden entsprechen der logisch-deduktiven ethodologie, Krankheiten werden also als gesetzmäßig darstellbare Entitäten begriffen. Damit ntsprechen diese Computerprogramme einer wissenschaftstheoretischen Tradition innerhalb der edizin, die von der Annahme ausgeht, daß die Diagnosefindung als ein formaler, nach bestimmten rinzipien ablaufender Prozeß zu betrachten sei und Krankheiten als nosologische Einheiten efiniert werden müssen. Eine Erkrankung ist dieser Auffassung nach nichts anderes als ein pezifisches Kollektiv verschiedener Symptome, die in streng kausaler Abhängigkeit zu pathophysiologischen Zuständen stehen. Die Diagnose, rein naturwissenschaftlich betrachtet, gliedert sich demnach auf in Hypothesengenerierung und -verifikation, die durch deduktive Schlußfolgerungen realisiert werden könne. Krankheiten werden als gesetzmäßig beschreibbare Prozesse betrachtet, die eine quantitative Abweichung von den physiologischen Normalwerten aufweisen und damit naturwissenschaftlich faßbar sind. Mit "Es handelt sich um einen sogenannten 'nivellierten statistischen Durchschnittsnormaspekt'; er geht ausschließlich auf Meßwerte zurück und ist daher letztlich apparativ feststellbar" beschreibt Viefhues(89) diese Richtung. Die naturwissenschaftliche Sichtweise, seit Mitte des 19. Jahrhunderts vorherrschende Auffassung in der Medizin, reduziert damit den Menschen auf die Biologie (90); d.h. sie betrachtet die klinischen Symptome als kausale Größen, die in Abhängigkeit zu bestimmten biologischen Dysfunktionen stehen.

Demgegenüber vertreten zunehmend einige Wissenschaftler(91) (94)(95) die Auffassung, daß die logisch- deduktive Sichtweise lediglich eine, aber nicht die einzige Dimension von Vorgehensweisen in der Medizin darstelle; als ebenso relevant wird hier die Berücksichtigung der individualspezifischen Ausprägung einer Erkrankung angesehen, die eines verstehenden oder hermeneutischen Zugangs bedarf(96). Entsprechend lassen sich zwei unterschiedliche Zugangsweisen an eine Krankheit differenzieren: das unmittelbare Erleben und das mittelbare, auf Reflexion basierende Zugehen. 'Der sich dem Kranken zuwendende Arzt geht sowohl auf den Kranken als Heilung suchender Person, von der er einen unmittelbaren Eindruck hat, ein, wie er einzelne Erscheinungen an dem Patienten als typische Merkmale eines bestimmten 'Falles', etwa als 'Fall von Gelbsucht' einordnet" (98).

Grundsätzlich lassen sich also für die Medizin zwei unterschiedliche, als gleichwertig zu betrachtende Methoden ermitteln: die Logik und die Hermeneutik. Die logische Zugangsweise an eine Erkrankung impliziert die folgerichtige Verknüpfung von Schlüssen; diese Methode läßt sich insofern formal darstellen, als das Denken in Form von Schlußfolgerungen stattfindet und mit dem Begriff "zweckrational" etikettiert werden kann. Die hermeneutische Methode zielt auf das individualspezifische Verstehen von Phänomenen, Situationen und Zusammenhängen, d.h. versucht, die aktuelle Erkrankung als lebensgeschichtliches Ereignis eines Individuums zu begreifen, ist also einem kommunikativen Erfassen gleichzusetzen. "Im Gegensatz zur Logistik beziehen sich hier die gebrauchten Werte nicht auf feste Marken und Signale, durch die etwas Eindeutiges bezeichnet wird, sondern (sie) entspringen der kommunikativen Bewegung menschlicher Weltauslegung, die in der Sprache geschieht" (99).

Die zweite Komponente ärztlichen Handelns, das hermeneutische Herangehen, bleibt in Expertensystemen unberücksichtig, muß unberücksichtigt bleiben, da die verstehende Haltung Lebenserfahrung, Alltagsverständnis, eben die lebende Existenz eines Menschen mit der Fülle aller körperlichen und seelischen Erfahrungen voraussetzt. Erst der deutliche Hinweis auf die Begrenztheit maschineller Diagnosefindung und die Determination der Defizite hinsichtlich hermeneutischer Methodik schaffen die Basis dafür, daß Expertensysteme nicht der technologischen Untermauerung der rein naturwissenschaftlichen Denkweise innerhalb der Medizin dienen und damit all denen als

leistungsfähiges Instrumentarium und unterstützendes Mittel gelegen kämen, die immer schon den kranken Menschen auf seine Symptomatik, auf sein Soma reduzierten.

8.6 Einsatzmöglichkeiten von Expertensystemen

Wenn Expertensysteme auch wesentliche Grenzen gegenüber der menschlichen Diagnosefähigkeit aufweisen, so sind dennoch Einsatzbereiche vorstellbar, in denen diese Systeme gute Dienste leisten könnten. Wie Elstein und andere (100) wie auch Hegglin/Siegenthaler (101) bemerken, existieren eine Reihe von Gründen für Fehldiagnosen bei Ärzten, die durch Expertensysteme dezimiert werden könnten. So liegt beispielsweise eine häufige Ursache von Fehleinschätzungen darin, daß an einer Ursprungshypothese trotz widersprechender Daten festgehalten wird, da diese einfach übersehen oder negiert werden. Weiter werden als Gründe von Fehldiagnosen persönliche Faktoren beschrieben wie:

- vorgefaßte Meinung, Rechthaberei und Eitelkeit
- Schwarzseherei oder notorischer Optimismus
- zu starke affektive Bindung an den Patienten (Angehörige)
- Bemühen, besonders interessante Diagnosen zu stellen (102)

sowie grundlegende intellektuelle Defizite, etwa die Unfähigkeit zu logischen Schlüssen oder zu konstruktivem Denken aufgeführt. In all diesen Fällen würden Expertensysteme insofern eine Hilfestellung bedeuten, als die parallel zum Menschen vorgenommene Diagnosefindung im Computer Fehlschlüsse offenlegte und persönliche Faktoren ausschlösse. Menschlich bedingte Irrationalitäten ließen sich auf diese Weise eingrenzen, da die Lösungen von Expertensystemen ein Anreiz zur erneuten Kontrolle des eigenen Resultates sein könnten.

Ein weiterer Vorteil von Expertensystemen ist die Möglichkeit, mit derartigen Computerprogrammen die Aktualität des Wissensstandes von Klinikern zu gewährleisten. Selbst wenn heutige Expertensysteme noch nicht über die Option verfügen, daß kontinuierlich neueste Forschungsergebnisseso in die existierenden Wissenbasen integriert werden, so sind doch Systeme in naher Zukunft denkbar, mit deren Hilfe jeder Arzt Diagnosen stellen könnte, die aktuelle Erkenntnisse mitberücksichtigen.

Zudem bieten Expertensysteme den Vorteil, daß aufgrund ihres streng formalen Vorgehens auch seltene, nahezu unbekannte Erkrankungen Beachtung finden, ein Umstand, der in der alltäglichen Diagnosetätigkeit kaum immer gewährleistet ist, weil der Kliniker oft nach dem alten Medizinermotto arbeitet: Das Häufige ist häufig, das Seltene ist selten (!).

Gelänge demnach die Einschränkung des Einsatz- und Gültigkeitsbereichs von Expertensystemen, könnten sie eine Erweiterung der Möglichkeiten von Medizinern bei ihrem Bemühen darstellen, Menschen zu heilen und menschliches Leid zu lindern. Überschreitet man jedoch diese Grenzen und überschätzt die Fähigkeiten maschineller Diagnosefähigkeit, führte dies zu einer weiteren Entmenschlichung des medizinischen Alltags und verstärkte die Tendenz, den Menschen mit seiner individuellen Krankheit auf seine isolierte Symptomatik zu reduzieren, ihn als bloßen Fall zu sehen.

8.7 Die Darstellung von Wissen in medizinischen Fachbüchern

Die Betrachtung der möglichen Konsequenzen eines Einsatzes medizinischer Expertensysteme in der Ausbildung setzt einen Vergleich zwischen Krankheitsmodellen aus Textbüchern und dem computerintern repräsentierten Wissen voraus. Die Verankerung der fachspezifisch relevanten Fakten und Zusammenhänge in Expertensystemen wurde oben bereits ausführlich dargestellt. Nunmehr soll auf die Darstellung von Erkrankungen in Textbüchern zur Ausbildung angehender Mediziner eingegangen werden. Heisig (104) dient hier als Beispiel für die typische Strukturierung einer Krankheitsbeschreibung in Medizinbüchern, nach der für die verschiedenen möglichen Diagnosen, d.h. die jeweiligen Krankheitsbilder, eine ähnliche Präsentation eingehalten wird.

Diesem Schema entsprechend wird die jeweilige Krankheit zunächst definiert und kurz beschrieben. Ätiologie und Pathogenese, d.h. die Ursachen einer Erkrankung, werden in der Folge dargestellt, d.h. bezogen beispielsweise auf eine Infektionskrankheit, werden das krankheitserzeugende Virus, der Organbefall und die Krankheitsfolge aufgeführt. Epidemiologische Aspekte wie Morbiditätshäufigkeit und Inkubationszeit schließen sich in der Beschreibung an. Die krankheitstypische

ymptomatik wird im Ablauf dargestellt, d.h. zeitliche Verschiebungen in der Symptomenkonstellation und der Schwere und Ausprägung der klinischen Zeichen werden ausführlich berücksichtigt. ie Art, wie die Diagnose gefunden werden kann, z.B. Ermittlung indizierender Symptome und aborwerte, Testverfahren zum Nachweis des Erregers, Röntgenbilder etc., wird in einer detailierten Form ausgeführt, wobei differentialdiagnostische Fragen, d.h. Hinweise auf Krankheiten, ie in ihrer Symptomatik nur geringfügig abweichen, jedoch anderen Erkrankungskategorien ngehören, mitberücksichtigt werden. In die Differentialdiagnose integriert ist auch die bwägung, inwieweit psychische oder soziale Komponenten für die Ausprägung der Erkrankung von edeutung sind. Therapievorschläge und Prognosen werden in Abhängigkeit zur Schwere der Erkrangen und zeitlichen Schwankungen vorgenommen, wobei Wahrscheinlichkeitsabschätzungen hinsichtich benigner und maligner Verläufe erfolgen. Symptomenverschiebungen, die sich im Verlauf der eilung ergeben können, werden ebenfalls erfaßt.

ährend die meisten Lehrbücher in der Medizin nach obigem Modell aufgebaut sind, d.h. spezifiche Krankheitsmodelle darstellen, existieren für den Kliniker, d.h. den bereits praktisch ätigen Arzt, sogenannte diagnostische Leitfäden, die vom Symptom ausgehend eine Darstellung der öglichen Erkrankung und der Diagnosefindung vornehmen. Marx (105) beispielsweise stellt das ymptom in den Vordergrund und diskutiert auf dieser Basis mögliche Erkrankungen, für die das eweilige Symptom besonders typisch ist. Anamnestische Angaben (allgemeine und krankheitsspezische Beschwerden, frühere Erkrankungen etc...), charakteristische Befunde sowie die Resultate er technischen Verfahren bieten die Basis für die Erhärtung einer spezifischen Diagnose, die ich aus der Auflistung der möglichen Krankheitsursachen eines Symptoms ergibt. Andere Autoren 106) gründen ihre Krankheitsbeschreibung vor allem auf einer ausführlichen Darstellung von athogenese und Ätiologie, um dem Lernenden eine Vorstellung vom Prozeß und den pathophysiologichen Bedingungen einer Erkrankung zu vermitteln. Eine Krankheit erscheint so in den meisten ehrbüchern als Entität, die zwar symptomatische Überlappungen zu anderen Erkrankungen aufweist Differentialdiagnose), jedoch zunächst als in sich geschlossenenes Modell betrachtet wird.

ier offenbart sich ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Wissensrepräsentation in mediziischen Expertensystemen wie GUIDON und MYCIN. Die Wissensbasis dieser Systeme beinhaltet orwiegend zunächst isolierte Fakten, d.h. es existieren keine Krankheitsmodelle, die der pezifischen Konstellation von Ursachen, Symptomatik, diagnostischen Methoden und Therapievorschlägen einer Erkrankung entsprechen. Die Diagnose in MYCIN richtet sich demnach lediglich auf ie Identifikation eines Organismus, den es zu therapieren gilt; damit ist jedoch nicht das rankheitsbild in seinem komplexen Gefüge repräsentiert. Ebenso fällt auf, daß zeitliche erschiebungen der Symptomenkonstellation und die differierenden Ausprägungsgrade der Schwere on Erkrankungen in der computerinternen Wissensbasis nicht repräsentiert sind. Krankheit wird eder als Entität noch als dynamische Kategorie begriffen, sondern reduziert auf die isolierte inzelsymptomatik. Während im Krankheitsmodell der Medizinbücher der Mensch als Patient immer noch auftritt, indem man beispielsweise die verschiedenen Erscheinungsformen, die individuelle chwankungsbreite der Symptomatik, die psychischen und sozialen Bedingungen und die Folgen von herapien für einen Patienten mitbedenkt und explizit darstellt, wird in Expertensystemen individuelle Krankheit zur objektivierten Summation von klinischen Zeichen. Die Kritik, die sich ereits gegenüber den herkömmlichen Medizinbüchern auf die häufig vorkommende Gleichsetzung eines Patienten mit einem "klinischen Fall" bezog, muß entschieden härter artikuliert werden gegenüber Expertensystemen, in denen menschliche Krankheit zu einer naturwissenschaftlichen Konstante wird und Diagnose sich auf die stringente Befolgung von Regeln beschränkt. Insofern erscheint der Einsatz von Expertensystemen in der Ausbildung nur als Hilfsmittel in sehr begrenzten Einsatzgebieten gerechtfertigt, da eine Untermauerung wenn nicht Verschärfung der rein naturwissenschaftlichen Sichtweise in der Medizin eine höchstwahrscheinliche Konsequenz wäre. Wurde bislang schon der menschliche Körper durch die Medizin aufgesplittet in zu differenzierende Krankheitsbilder, erfolgt im Zuge der Wissensrepräsentation in Computern eine noch weitergehende Zergliederung des Menschen, bei der Einzelsymptome, Organismen und isolierte Fakten an die Stelle des Krankheitsgefüges treten. Expertensysteme können demnach keine Lehrbücher ersetzen, in denen eine detaillierte Schilderung klinischer Fälle dem angehenden Mediziner eine Vorstellung über Krankheitsbilder und eine Einsicht in individuelle Krankheitsabläufe ermöglicht, da sie lediglich abstraktes, vom Menschen völlig losgelöstes Wissen vermitteln, das zwar in der späteren Praxis durchaus hilfreich ist, im Ausbildungsbereich jedoch nur mit Umsicht weitergegeben werden sollte.

8.8 Grenzen der maschinellen Diagnostik und Therapie

Die Relevanz der persönlichen Beziehung zwischen Arzt und Patient für die Diagnosefindung gilt übereinstimmend als gesichert. Persönliche Kontaktaufnahme und die Fähigkeit, soziale und psychische Faktoren auf der Grundlage der Alltagserfahrung bezüglich ihrer Relevanz für eine Krankheit einschätzen zu können, machen erst einen guten Diagnostiker aus. Ebenso relevant ist die Sprache; unterschiedliche Sprachniveaus und sozialgebundene Wortbedeutungen sind nur für den verständlich, der über ein umfassendes Wissen sozialer Gegebenheiten verfügt, entsprechende Sprachäußerungen wären damit durch ein Computerprogramme nicht bearbeitbar. Die Intimität der Befragung durch einen Arzt schafft darüberhinaus erst die psychische Basis für freie und ungehemmte Artikulationen persönlicher Details durch den Patienten. In der Interaktion mit einer Maschine träte immer die Angst vor Zentralspeicherung und Abrufmöglichkeit auf.

Ein weiteres Defizit maschineller Anamneseerhebung ist die Unmöglichkeit der Interpretation von Symptomen, etwa bezogen auf die Einschätzung eines Patienten, der hypochondrisch übertreibend seinen Schmerz staerker oder aber diesen überspielend geringer darstellen kann, als er real ist. Die richtige Bewertung eines individuellen Schmerzes bedarf also einer übergreifenden Kenntnis menschlicher Persönlichkeitstypen, eine Fähigkeit, die ein Mensch im Laufe seiner Sozialisation durch dauernde Interaktionen erwirbt und die somit von einem Computer nicht einfach simuliert werden kann.
Besonders problematisch ist das Unvermögen von Computern, die Individualität der Ausprägung von Symptomen und der Symptomverarbeitung zu beachten. Bernoth (107) weist in diesem Zusammenhang auf die Schwierigkeiten hin, die sich aus der Schmerzanalyse ergeben und verdeutlicht, welche Spannbreite völlig differenter Verarbeitungsmuster zu beobachten ist und wie unterschiedlich die Angaben zur Schmerzintensität ausfallen. Ob Schmerz als schicksalshaftes Erlebnis empfunden wird, ob die Frage nach dem Sinn der Existenz gestellt wird, ob ein individuelles Aufbäumen stattfindet, ob der Schmerz als Erweiterung der Erfahrung begriffen wird, die variierenden Bewältigungsformen von Schmerz bzw. Krankheit führen zu wichtigen Schlüssen, die der Arzt für Diagnose und Therapie ziehen muß. Die psychosomatische Medizin (108)(109)(110)(111)(112) weist daraufhin, daß jedes körperliche Geschehen auch eine psychische Komponente beinhaltet, die von demjenigen, welcher die Diagnose stellt, mitberücksichtigt werden muß bei der Identifikation einer Erkrankung. Eben diese Ebene jedoch setzt menschliches Einfühlungsvermögen, Lebenserfahrung, Alltagswissen, eben die Fülle des Wissens über Menschsein und Welt voraus, die in ein Computerprogramm nicht implementierbar ist, setzt "Seele", Gefühl und Emotionalität voraus.

Die Relevanz, die das Alltagswissen eines Arztes für seine Diagnosefindung hat, wird deutlich, wenn man die Notwendigkeit des "kommunikativen Sich- Einlassens auf die Person des Patienten" (113) berücksichtigt. Die Interpretation der sprachlichen und averbalen Äußerungen eines Patienten, die dem verstehenden Zugang zu einer Erkranung zugrunde liegen, setzt sogenanntes Umgangswissen voraus, d.h. Wissen über fremde Sinn- und Lebensentwürfe, wie es von den meisten Menschen im Verlauf ihrer Sozialisation erworben wird. Die eigene Erfahrung, daß man als Mensch in Sinngebilden lebt, bildet das Fundament, auf dem hermeneutisches Verstehen möglich ist.

Dies stellt wohl das entscheidenste Defizit medizinischer Expertensysteme dar; das Fehlen von Erfahrung im weitesten Sinne, die neben dem medizinischen Wissen als zweite zentrale Kategorie für die Diagnosefindung gilt. Basis jeglicher Erfahrung ist Erfahrung der Wirklichkeit, der unmittelbaren, vorwissenschaftlichen Wirklichkeit, der jeder Mensch ständig ausgesetzt ist. Diese Erfahrung wird wirksam bereits in der ersten unmittelbaren Begegnung von Arzt und Patient.Die Interaktionspartner treffen einander in einem "diffus-komplexen Umgangsfeld.., begegnen sich in der unmittelbaren Wirklichkeit" (115). Diese Begegnung bewirkt den vagen, oft unbewußten Gesamteindruck oder die ganzheitliche Wahrnehmung, die nunmehr das Fundament der nun folgenden Reflexionsstufe darstellt. In der Reflexion wird der Patient unter dem Blickwinkel seiner Symptome, d.h. in Einzelaspekten betrachtet. Hier bildet sich eine artifizielle Wirklichkeit, die auf der medizinischen Sichtweise gründet. "Sie erfaßt nie die "ganze" Wirklichkeit. Immer bleibt ein namhafter Rest übrig" (116). Diese reduzierte Wirklichkeit schlägt sich auch in den Krankheitsmodellen nieder, die niemals mit der unmittelbaren Wirklichkeit, d.h. dem individuellen Krankheitserleben gleichzusetzen sind. Ein Arzt muß demnach auf der Basis seiner vorwissenschaftlichen, unmittelbaren Wirklichkeitserfahrung das begrifflich gefaßte Krankheitskonzept als divergent zum aktuellen Krankheitsprozeß begreifen und in seiner Entscheidung beides bedenken, "die unmittelbar erfahrene Wirklichkeit und die wissenschaftlich erdachte artifizielle Realität" (117). Komplexe Wirklichkeitserfassung und einzelwissenschaftliche Abstraktion bilden so das Gefüge, in dem die ärztliche Diagnose ihren Platz hat. "Die ärztliche Kunstausübung beruht auf einem auf Erfahrung und Wissenschaft gegründeten "Können", einer Kenner- und Könner-

haft, welche in der Tradition als ars medicinä bezeichnet wird" (118).

r Einsatz von Expertensystemen verstärkt dagegen eine Tendenz innerhalb der Medizin, die mit m Begriff der Rationalisierung die zunehmende Geringschätzung nicht rationaler Aspekte der ztlichen Entscheidungstätigkeit zu treffen versucht. Während bislang immer noch durch die distenz persönlicher Interaktion zwischen erfahrenen Klinikern und Anfängern Aspekte wie ntuition und schöpferisches Deuten vermittelt werden konnten, wird durch die zunehmende chnisierung diese Dimension immer mehr vernachlässigt und gewänne durch Expertensysteme eine nsätzliche Einschränkung. "Die erschreckende Rationalisierung aller ärztlichen Handlungsele- nte bewirkte, daß alle nicht rational kalkülisierbaren Bestandteile der Handlung in Forschung nd Lehre ausgeblendet wurden." (119) So erscheint es dringlich, die Relevanz der hermeneuti- chen Methode, die Wichtigkeit des unmittelbaren ganzheitlichen Zugangs und die Bedeutung der ntuition für die medizinische Diagnostik hervorzuheben und aufzuzeigen, daß gegenwärtig xistierende Expertensysteme bei weitem nicht zu dem in der Lage sind, was mit dem Begriff der ärztlichen Kunst" oder "Deute-Kunst" wohl gut umschrieben worden ist.

9.1 Zur Frage der Formalisierbarkeit des Denkens und des Bewußtseins

9.1.1 Einleitende Bemerkungen

Die Annahme innerhalb der KI-Forschung, menschliche Kognition und menschliches Bewußtein ließen sich durch formalisierte Strukturen abbilden und damit auf Computersysteme übertragen, impliziert erkenntnistheoretische Probleme, von denen einige im Folgenden aufgegriffen werden sollen.

Die Zielsetzung, menschliches Bewußtsein durch Computer nachzuahmen, ja gar eine unabhängige maschinelle Bewußtheit für möglich zu halten, forderte Kritiker wie Searle (1), Dreyfuss (2) und Weizenbaum (3) geradezu heraus. Konzepte, in denen eine Identifikation der Besonderheiten des menschlichen Bewußtsein versucht wie auch die alte philosophische Frage neu reflektiert wurde, ob sich Denken überhaupt adäquat formalisieren lasse, wurden in der Folge eben jener Grundüberzeugung entwickelt, die von der Isomorphie kognitiver Prozesse von Mensch und Maschine ausgeht.

Begriffe wie Intelligenz, Denken, Verstehen, Wissen und Erkennen gewinnen durch diesen Disput neue Aktualität. Eine Gegenüber- stellung des Begriffsverständnisses in der KI-Forschung mit weitergefaßten Konzeptionen stellt dabei eine mögliche Vorgehensweise dar, um einige der damit assoziierten epistemologischen Fragen aufzugreifen.

9.1.2 Die erkenntnistheoretische Position der KI-Forschung

Innerhalb der KI-Forschung existiert die weit verbreitete Annahme, daß das menschliche Bewußtsein auf formale Regeln zurückzuführen und damit einer maschinellen Simulation grundsätzlich zugänglich sei. Wenn auch die anfängliche Euphorie vieler AI-Forscher einer größeren Skepsis gewichen ist und man nicht mehr von einer baldigen Realisierung maschinellen Bewußtseins ausgeht, so wird trotz zahlreicher Fehlschläge nach wie vor die Überzeugung vertreten, daß irgendwann ausreichend präzise Kenntnisse darüber existieren, wie das menschliche Bewußtsein zu formalisieren und damit auch auf Computer zu übertragen sei. Ein allgemein bekannter Vertreter dieser Auffassung ist Douglas Hofstadter(4), der davon ausgeht, daß das, was uns heute als diffuses, nichtformalisierbares Unterbewußtes erscheint, lediglich Formalstrukturen auf einer tieferen Ebene unseres Bewußtseins entspricht, dessen explizite Determination noch ausstehe. Hofstadter vertritt die Ansicht, daß "das Denken in all seinen Aspekten als eine Beschreibung hoher Stufe eines Systems verstanden werden kann, das auf einer tieferen Stufe von einfachen, sogar formalen Regeln beherrscht wird" (5). Danach funktionierten auch die tieferen, bislang noch unerforschten Dimensionen unseres Bewußtseins nach formalen Prinzipien und erwiesen sich als grundsätzlich transformierbar.

Entsprechend werden kognitive Operationen, Denkvorgänge und Erkenntnisprozesse als formalisierbare Dimensionen des menschlichen Geistes begriffen. Negrotti (6) ermittelte in einer Studie über wissenschaftstheoretische und philosophische Annahmen in der KI-Forschung, "that AI people are convinced that the human way of acting intelligently is effectively substantial, or reducible, in formal procedures" (7). Zwar wird eine völlige Analogie von Computern und menschlichem Bewußtsein nur von einem geringen Prozentsatz der Wissenschaftler behauptet, doch nimmt die überwältigende Mehrheit eine zumindest teilweise Isomorphie - insbesondere bei kognitiven Operationen - von Mensch und Computer an.

Das Gehirn des Menschen wird als System verstanden, dessen diffuse, nichtformal scheinende Phänomene auf formalen Mechanismen basieren. Die Statusänderungen im Gehirn sind dieser Auffassung entsprechend zurückzuführen auf Regeln. Grundlegende formale Mechanismen steuern demnach die Fülle an Hirnfunktionen, sind also das Fundament von Kognition und Bewußtsein. Die angenommene Isomorphie zwischen Mensch und Computer äußerte sich darin, "daß auf einer gewissen Ebene zwischen den ausgeführten Schritten sowohl im Gehirn als auch im Computer eine Entsprechung besteht" (8). Die Äquivalenz wird als strukturelle begriffen, d.h. , trotz der vorhandenen Differenzen von organischem Substrat und Hardware wird die Vergleichbarkeit von Software und höheren Hirnprozessen als zulässig erachtet.

Wenn auch heute allgemein zugegeben wird, daß die bisherigen Resultate der KI-Forschung kaum der menschlichen Intelligenz entsprechen, so erwartet man doch eine progrediente Annäherung. "In dem Grad, in dem sich die Intelligenz von Maschinen entwickelt, werden die ihr zugrundeliegenden

echanismen allmählich mit den der menschlichen Intelligenz zugrundeliegenden Mechanismen onvergieren" (9).

.1.3 Philosophische Tradition der KI-Forschung

ersucht man eine Determination der philosphischen Position, welcher sich die KI-Forscher am hesten zugehörig fühlen (10), so weisen die meisten Wissenschaftler eine deutliche Präferenz ur formalen Philosphie auf. Entsprechend gilt die Formale Logik oder Logistik als das Gebiet, uf welches sich die Künstliche Intelligenz sowohl wissenschaftstheoretisch als auch methodisch eruft. Dabei steht die rein syntaktische Formalisierung im Vordergrund, wie sie in der mathema- ischen Logik betrieben wird. In KI- Konzepten werden demnach oft die inhaltlichen Bedeutungen ugunsten der rein strukturellen Beziehungen vernachlässigt. Diese theoretische Position blickt, bwohl ihre konsequenteste Ausrichtung erst zu Beginn dieses Jahrhunderts entwickelt wurde, auf ine lange philosophische Tradition zurück, auf die kurz eingegangen werden soll.

ristoteles - als "Vater der Logik" bezeichnet(11), obwohl der Begriff 'Logik' auf die Stoa urückgeht - definierte die Logik als die Lehre vom Denken in Begriffen. Durch formale logische rundgesetze sollte die Exaktheit und Sachlichkeit von Denk- und Erkenntnisprozessen gewährlei- tet werden. Ähnlich wie bei Platon galt lediglich solches Wissen als relevant, das in Form indeutiger Anweisungen und Definitionen ausgedrückt werden konnte. Alles übrige wurde als loßes Glauben oder Meinen abgetan und der Unsystematik und Irrelevanz bezichtigt. Dennoch pielten bei Platon semantische Kategorien eine Rolle insofern, als die Grundbegriffe seines ormalen Systems in ihrer Bedeutung intuitiv erfaßt werden mußten. Das Subjekt als bedeutungszu- eisende Instanz war im Platonschen, ähnlich wie im Artistotelischen Erkenntnismodell also noch orhanden und verlor erst mit der rein syntaktisch ausgerichteten mathematischen Logik seinen tellenwert, indem semantischen Überlegungen (der Rückgriff auf Bedeutungen) auf Techniken der yntaktischen (formalen) Manipulation reduziert wurden (12).

obbes und Leibniz gehören zu den frühen Philosophen, die Denken als Rechenvorgang betrachteten nd eine Formalsprache konzipieren wollten, in der jedem Gegenstand ein eindeutiges Symbol uzuweisen wäre und Relationen zwischen Objekten sich als Zahlenrelationen repräsentieren ießen. Boole setzte - in dieser Tradition denkend - im 19. Jahrhundert das Denken mit einem erechnungsvorgang gleich und sah in der von ihm konzipierten binären Algebra die Basis für die ildung einer Formalsprache, mit der das Denken vollständig gefaßt werden könne. Parallel dazu ntwickelte Charles Babbage eine sogenannte analytische Maschine, die zwar nie gebaut, in ihrer onzeption jedoch logische Operationen durchführen konnte. Diese Maschine schuf den theoreti- chen Grundstein für die späteren Digitalrechner, d.h. sie stellte letztlich den ersten Computer ar. Mit dem Entwurf eines Digitalrechners wurde die erste universelle Maschine geschaffen; Denn da ein Digitalcomputer mit abstrakten Symbolen operiert, die für alles stehen können, und ogische Operationen verwendet, die alles mit allem verbinden können, ist jeder Digitalcomputer anders als ein Analogrechner) eine universelle Maschine" (13). Zusätzlich konnten erstmalig rozesse, die als Folge von Befehlen für die Manipulation mit unstetigen Objekten beschrieben erden, grundsätzlich von einem Digitalrechner reproduziert werden. Die Fähigkeit, Symbole zu andhaben, wurde von Turing in den Fünfziger Jahren hervorgehoben und von diesem als die Basis ür die Möglichkeit maschineller Intelligenz angesehen.

eben der philosophischen Tradition, die von einer prinzipiellen Formalisierbarkeit des Denkens usgeht, beruft sich die Künstliche Intelligenz auf materialistische Positionen innerhalb der eib-Seele- Diskussion, d.h. auf die Annahme, daß geistige Prozesse materiellen entsprächen und omit maschinell simulierbar sein müßten. Der Titel des Werkes von Lamettrie (14): "L'Homme achine" - der Inhalt des Buches tendiert bemerkenswerterweise in eine dualistische Richtung - ird in diesem Zusammenhang oftmals zitiert als Hinweis auf die Annahme innerhalb der Phi- osphie, der menschliche Geist entspräche den formellen Mechanismen von Maschinen. Entgegen der artesianischen Auffassung, nach der Körper und Geist als unabhängige Entitäten begriffen urden, vertritt die streng materialistische Position die Auffassung, daß alle mentalen Vorgänge uf physikalischen Prinzipien basierten, bzw. daß geistige Prozesse identisch seien mit Ereig- issen im Gehirn; zu ihren Vertretern zählen Smart und Armstrong. Eine andere, innerhalb der I-Forschung weithin akzeptierte Ausprägung der sogenannten Identitätstheorie, die von Fodor, ennett und Putnam repräsentiert wird, vertritt die Annahme, "daß geistige Zustände nicht mit ustänaden des Gehirn als solchem identisch sind, sondern eher mit funktionalen Rollen, die vom ervensystem bei der Lenkung des Organsimus ausgeübt werden" (15). Eine mechanizistische ariante des strengen Materialismus wird von Turing und Scriven vertreten, nach der geistige kte als komplexe Transformationen zwischen Daten angesehen werden, wobei die Daten sensorische

Reize darstellen bzw. mental repräsentierte Objekte. Das Gehirn wird hier als komplexe Rechenmaschine begriffen.

Obwohl der größte Teil der KI-Forscher sich den materialistischen Positionen zuordnet, vertritt doch eine erwähnenswerte Anzahl eine dualistische Position (16), wobei letztlich eine Übereinstimmung dahingehend gefunden werden kann, daß beide Richtungen eine formale Deskription mentaler Prozesse für möglich und erstrebenswert erachten.

9.2 Kritik der Wissensrepräsentation

9.2.1 Grundsaetzliche Fragen zur Implementation von Wissen

Die Repräsentation von Wissen in Computern wirft eine Reihe von epistemologischen Fragen auf, die sich vor allem auf das Problem beziehen, inwieweit eine Abbildung der Wirklichkeit in Computern möglich ist bzw. ob existierende Repräsentationsstrukturen hinreichen, die Realität bzw. das menschliche Wissen über Realität adäquat darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit können lediglich einige erkenntnistheoretische Fragen aufgegriffen werden. Dabei steht die Problematisierung der Transformation, Formalisierung und Eingrenzung von Wissen im Vordergrund, da diese Phänomene die strukturelle Basis der Implementation von Wissen in Computern darstellen. Unterschieden werden muß dabei grundsätzlich zwischen der computerinternen Repräsentation der Welt an sich bzw. der Repräsentation von Wissen über die Welt. Während in Computer- simulationen Teilaspekte der unmittelbaren Realität nachgeahmt werden, stellt das Wissen über die Welt jenen Bereich dar, der in KI- Systemen implementiert werden soll. Diese Tatsache impliziert nicht nur eine Beschränkung der Wissensbasen auf jene Form von Wissen, das in verbalisierter Form von Menschen dargelegt werden kann, sondern bewirkt, daß Probleme der Referenz von Wissen und Wirklichkeit unberücksichtigt bleiben. Der Zusammenhang mit der 'Welt-an-sich' wird demnach kaum reflektiert, noch wird überprüft, ob das gespeicherte Wissen mit dem jeweiligen Realitätsausschnitt kongruent ist.

Die grundlegende Annahme innerhalb der KI-Forschung äußert sich in der Vorstellung, daß das Wissen eines Menschen im Gehirn durch bestimmte Strukturen repräsentiert wird. Diese Position wird von vielen Psychologen und Philosophen geteilt, die von einer expliziten Repräsentanz unseres gesamten Wissens im menschlichen Gehirn ausgehen.

Eine konträre Auffassung vertreten Existentialphänomenologen wie Merleau- Ponty (17),aber auch Philosophen wie Wittgenstein (18), die annehmen, daß das Wissen über menschliche Lebenspraktiken und Interessen gar nicht repräsentiert werden muß, sondern in Form von Bildern, körperlichem Erleben und Erahnen für den Menschen verfügbar ist.

Die entscheidenden epistemologischen Fragen zur Repräsentation von Wissen, die sich aus der Zielsetzung ergeben, menschliches Wissen in Computer zu übertragen, sind folgende:

- welche Form von Tatsachen über die Welt sind dem Beobachter zugänglich,
- wie läßt sich eine computeradäquate Transformation vornehmen,
- welche Regeln ermöglichen korrekte Schlußfolgerungen auf der Basis dieser Tatsachen,
- wie läßt sich eine Eingrenzung von Wissen vornehmen, ohne daß wesentliche Aspekte unberücksichtigt bleiben?

Diese eher pragmatischen Fragen sollen ergänzt werden durch allgemeinere Überlegungen, die sich auf die prinzipelle Problematik einer Formalisierung von Wissen über die Wirklichkeit, die Referenz von Begriffen und die Transformation von Realitätseindrücken in körper- und empfindungslose Maschinen beziehen.

9.2.2 Das Mikrowelt-Konzept der KI-Forschung

Im Zusammenhang mit der Konzeption wissensbasierter Systeme etablierte sich die Auffassung innerhalb der KI-Forschung, daß es nützlich und auch zulässig sei, eingegrenzte Ausschnitte der Wirklichkeit, sogenannte Mikrowelten zu konzipieren, um so die Voraussetzungen zu schaffen für die Implementation der relevant scheinenden Fakten. Diese Konzeption impliziert die Akzeptanz einer Einschränkung und Reduktion des Wissens in einem Problemgebiet sowie die Hinnahme einer "Unvereinbarkeit mit der buchstabengetreuen Wahrheit" (19). Die Kombination einer großen Anzahl

n Mikrowelten wird dabei als potentielle Möglichkeit angesehen, die Fülle an Wissen in mputer zu übertragen, die für das menschliche Wissen bzw. Alltagsverständnis charakteristisch t. In den Wissensbasen dieser Mikrowelten wird die Bedeutung von Begriffen reduziert auf die nktion, die sie in dem jeweils isolierten Wirklichkeitsausschnitt haben. Die jedem Begriff newohnende Fülle an menschlichen Erfahrungen, die sich beim Zugriff auf jeden noch so engbe- enzten Realitätsbereich offenbart, kann dabei ebenso wenig berücksichtigt werden wie das ngebundensein jedes Einzelkontextes in einen kontextuellen Gesamtzusammenhang, der durch die nschliche Lebensform gestaltet wird.

nter dem Konzept der Mikrowelten verbirgt sich die Auffassung, daß eine endliche, d.h. grenzbare Auflistung von Fakten die Realität ausreichend repräsentiere und daß dementsprechend ne Isolation einzelner Teilausschnitte legitim sei. Die dem zugrundeliegende atomistische nahme, Wissen ließe sich in Einzelelemente aufteilen, erkennbar an dem häufig benutzten griff "pieces of knowledge" (20), verkennt, daß verstehendes Wissen immer auch ein ganzheitli- es, wesensmäßiges Erfassen impliziert(21). Die Vorstellung einer in isolierte Bereiche zu iedernden Wirklichkeit ist einem Verständnis von Welt diametral entgegengesetzt, das diese greift als "organisiertes Ganzes von Objekten, Zwecken, Fertigkeiten und Gebräuchen, innerhalb ssen menschliches Handeln eine Bedeutung hat oder einen Sinn ergibt" (23). In jedem für sich trachteten Ausschnitt der Wirklichkeit ist damit immer schon die gesamte Wirklichkeit enthal- n (24).

berücksichtigt bleibt damit der Entstehungszusammenhang jenes partikularen Wissens. Durch die olation bestimmter formalisierbarer Kompetenzen gerät individuelles Wissen zum operationali- erten Instrument. Das jeder menschlichen Erfahrung innewohnende Potential an kontextüber- hreitender Erkenntnis degradiert zur bloßen statischen Repräsentation von Einzelaspekten. giert wird, daß Erfahrung, selbst die streng fachspezifische, immer mit der Lebensgeschichte nes wissenden Subjekts assoziiert ist, ja durch dieses unmittelbar beeinflußt wird. In mputerprogrammen wird dieses subjektspezifische Wissen zur objektivierten Konstante, da es abhängig vom Subjekt und vom menschlichen Bewußtsein existiert. Da ja aber beispielsweise in pertensystemen gerade eben jene individuelle Erfahrung implementiert werden soll, gilt hier ch der Einwand nicht, daß durch die Darstellung von Wissen in Büchern immer schon eine bjektentfremdete Form von Wissensvermittlung stattgefunden hat. Handelte es sich jedoch bei chern immer um die Darstellung von Faktenwissen, so trennt man durch Computer das Erfahrungs- issen vom Subjekt. Durch die computeradäquate Transformation wird das menschliche Wissen eutral, entbehrt der subjektiven Urteilskraft, der individuellen Wertung und präsentiert sich m potentiellen Benutzer unvermittelt. Offenbar wird die reduzierte Sichtweise dort, wo das eskriptive als das Reale begriffen wird (25), d.h. die Formalisierung als hinreichende Be- chreibung der subjektiven Erfahrung gilt.

as Mikrowelt-Konzept, daß der Entwicklung von Wissensbasen in KI-Systemen zugrundeliegt, asiert somit auf einer rein instrumentalistischen Sichtweise, d.h. es wird lediglich unter dem esichtspunkt der Verwertbarkeit betrachtet und für gültig erklärt. Die Frage nach der Isomor- nie von menschlichem und maschinellem Wissen wird ausschließlich produktorientiert gestellt. So ienen die erzielten Resultate von Mensch und Computer als ausreichendes Kriterium für die nnahme, es handle sich um kongruente Formen von Wissen. Maschinelles Wissen wird beurteilt nter dem Gesichtspunkt seiner Verwertbarkeit und seiner Nützlichkeit. Und hier trifft zu, was ls Merkmal positivistischer und konventionalistischer Theorie gilt: "Die Wahrheitsfrage " wird durch eine Präferenzfrage" (26) ersetzt.

.2.3 Problematisierung der computerinternen Repräsentation von Alltagswissen

ach den anfänglichen Erfolgen bei der Konzeption wissensbasierter Systeme stieß die KI-For- chung stets dort an Grenzen, wo das menschliche Alltagswissen als relevanter Bestandteil von roblemlösungen fungiert. Der Entwurf von Strukturen, mit denen die Repräsentation eben jenes issens erleichtert werden sollte, wurde zuerst von Minsky(27) vorgenommen, der mit eben dieser ielsetzung die "Frames" entwickelte. Er bezog sich dabei auf die Auffassung Husserl's (29), ach der Erwartungen den intentionalen Horizont bilden für die Wahrnehmung von Objekten und die ntizipation von Fakten. Mit dem Begriff "Noema" umschreibt Husserl die im Bewußtsein vorgenom- ene Strukturierung von Alltagsobjekten, die eine Grundlage für das Erkennen von Objekten arstellt. Die Übertragung dieses Konzepts auf die Frame-Entwürfe ist in mehrfacher Hinsicht roblematisch. Bereits Husserl selbst erkannte die Grenzen seines theoretischen Entwurfs; er erücksichtigte mit den Noemata lediglich den inneren Horizont, c. h. das gedankliche Konstrukt,

und vernachlässigte dabei die Tatsache, daß jeder Gegenstand ebensosehr determiniert ist durch den äußeren Horizont, d.h. die menschliche Praxis und den kulturellen Kontext. Unberücksichtigt bleibt somit das Eingebundensein jedes Objektes in ein Geflecht von sozialen Gewohnheiten, von menschlichen Zielen und Bedürfnissen sowie von kontextbezogenen und kontextübergreifenden Bedeutungen, wie sie durch die menschliche Existenz, aber auch den sensomotorischen Apparat des Menschen, d.h. seine Körperlichkeit erst konfiguriert werden (30).

Gleiches gilt für die stereotypisierte Darstellung von Ereignissen, wie sie beispielsweise durch Scripts realisiert wird. Auch diese Repräsentationen entbehren des inneren und äußeren Horizonts, wie er für das menschliche Erfassen von Situationen typisch ist. Hinzu kommt die Schwierigkeit, daß Wünsche, Gefühle und das Selbstverständnis, das Individuen von sich als menschliche Wesen haben, eine unendliche Zahl von Möglichkeiten für das menschliche Leben eröffnen. Der theoretisch antizipierte Versuch, in Computerwissensbasen eine Repräsentation aller Möglichkeiten von Situationsabläufen zu integrieren, um für alle potentiellen Fälle eine eindeutige Bedeutungszuweisung vornehmen zu können, erscheint angesichts dieser Unendlichkeit von Möglichkeiten sinnlos. Dieser Auffassung widerspricht jedoch beispielsweise Schank, indem er annimmt, daß die Typisierung von Situationen möglich ist und die Zahl von Lebensthemen in Grenzen gehalten werden kann. Obwohl auch Soziologen wie beispielsweise Berger und Luckmann (31) von einer Schematisierung unseres Alltagswissens ausgehen, so ist doch immer gegenwärtig, daß der Mensch durch sein kontextuelles Eingebundensein in eine soziale Situation immer auch Verständnis für nichtstereotype Abweichungen von Ereignisabläufen hat, diese also auf der Grundlage seiner allgemeinen Lebenspraxis einordnen kann.

Der entscheidenste Unterschied zwischen einem Menschen und einer Maschine besteht wohl darin, daß ein Mensch immer in der Situation ist, d.h. sie konkret und sinnlich erlebt, während die Maschine körperlos stets außerhalb ist. Erst das unmittelbare Erfassen der Atmosphäre, Stimmungen und Interessen, das körperliche Erleben und die soziale Involviertheit des Subjekts bedingen die Fülle und Dichte, die charakteristisch ist für das menschliche "In-der-Situation-Sein" (32). Indem der Mensch unmittelbar in der Situation ist, schafft er diese in einem geistigen Akt. Eine Situation ist damit nicht losgelöst zu denken vom beteiligten Subjekt, ja wird erst durch dieses in ihrer besonderen Form konfiguriert. Dieses unmittelbare Erleben von Wirklichkeit, die Basis von Alltagswissen, stellt in dieser spezifischen Form eine ontologische Besonderheit dar und bedingt die Unmöglichkeit, eine äquivalente Form dieses Wissens in Computern zu verankern.

9.2.4 Beschränkung auf verbalisierbares Wissen

Wie bereits deutlich wurde, bleibt die maschinelle Transformation von Wissen beschränkt auf das sprachlich vermittelbare Wissen. Probleme treten demnach immer dann auf, wenn Dimensionen menschlichen Wissens tangiert werden, die nicht verbalisierbar, vielmehr vorstellungs- und gefühlsmäßig sind. Dieses intuitiv-emotionale Wissen greift in jeden Wissensinhalt mit ein, bilden doch Vorstellungen und subjektives Erleben wesentliche Aspekte von Wissensinhalten. Ebenso beinhaltet jedes Wissen nicht nur die Kenntnis über ein konkretes Phänomen, sondern ihm ist immer auch ein Teilaspekt jenes gesammelten Wissens über die Welt immanent, wie es der Mensch im Verlauf seiner ontogenetischen Entwicklung erwirbt. Ein Wissensinhalt ist somit nicht nur in seinem kontextuellen Bezug erfaßbar, sondern sein Verständnis setzt allgemeines Wissen über die Welt voraus. Dieses allgemeine Weltwissen ist jedoch schon deshalb nicht sprachlich vermittelbar, als es nicht bewußt mit einem Wissensobjekt verknüpft wird. Es wohnt dem Menschen aufgrund seiner spezifischen Entwicklung inne und stellt den Hintergrund dar, auf dem ein konkretes Objekt erfahrbar wird.

Wissen bildet die Basis der Wirklichkeitserfassung, wobei die Wirklichkeit das Wissen wiederum erst konfiguriert (33). In der sinnhaften, objektivierenden Interaktion mit der Wirklichkeit schafft der Mensch sein je individuelles Wissen, das ihm ermöglicht, seine Umwelt zu begreifen und sich in ihr zurechtzufinden. Wissen basiert dabei nicht nur auf der sinnlichen Erfassung der Wirklichkeit, die in den konkreten Vorstellungen manifest wird, sondern gründet ebensosehr auf real vollzogenen sowie antizipierten Handlungszusammenhängen. Wissen impliziert demnach Erfahrung, die all jenes Erleben umfaßt, durch welches sich die menschliche Interaktion mit seiner Umwelt auszeichnet. Verbalisierbar ist dabei zumeist nur der konkrete Handlungsvollzug, das gegenständliche Erleben, während doch in jeder menschlichen Erfahrung Aspekte seines ganzen individuellen Seins miteinfließen. Stellt man die Erfahrung, d.h. das durch eigene Anschauung, durch eigenes Erleben gewonnene Wissen dem Wissen gegenüber, das überwiegend auf Reflexion, auf abstrakten Denkprozessen basiert, dann wird offenbar, daß sich jede menschliche Erfahrung niemals vollständig durch das Medium der Sprache mitteilen läßt. Betrachtet man dies nun unter

h Blickwinkel der Repräsentation von Wissen in Computersystemen, fällt dieses Defizit vor em da ins Auge, wo ja gerade die Implementation von Erfahrungswissen angestrebt wird, nämlich Expertensystemen. Die individuelle Kompetenz eines Experten, die ja in hohem Maße auf jener bjektiven Erfahrung basiert, ist - betrachtet man die Notwendigkeit sprachlicher Darstellung h Basis der Wissenstransformation - eben nur begrenzt, nur unvollständig konkret erfaßbar, so ß in jeder maschinellen Wisssensbasis immer ein Mangel herrschen wird, d.h. letztlich nur es Wissen darstellbar sein wird, daß in der konkreten sprachlichen Äußerung seinen Niederhlag findet, nicht jedoch jenes Wissen, daß sich im Handeln eines Experten, in seiner Haltung derspiegelt.

2.5 Formalisierung von Wissen

e bereits in früheren Kapiteln deutlich wurde, stellt die formallogische Repräsentation eine sentliche Grundlage für die Implementation von Wissen in Computern dar (34). Menschliches ssen wird entweder unmittelbar oder vermittelt durch übergeordnete Strukturen in formallogie Sätze transformiert, die als äquivalent betrachtet werden zum wirklichen Wissen des nschen. Neben den bereits angedeuteten Implementations-Problemen, beispielsweise der Schwiigkeit, mehrdeutige Satzbedeutungen in eindeutigen Begriffsfolgen zu fassen, impliziert die rmallogische Transformation einige grundlegende erkenntnistheoretische Fragestellungen.

e logischen Formalstrukturen, und auf diesen basieren letztlich die meisten der Repräsentaonsformen in Computerwissensbasen, sind ihren Gegenständen gegenüber indifferent. Gleichgülg, ob geistig, materiell, kulturell oder natürlich, werden die Begriffe den gleichen "allgeinen Gesetzen der Organisation, Kalkulation und Schlußfolgerung unterworfen - aber als ngible Zeichen oder Symbole, unter Abstraktion von ihrer besonderen 'Substanz'" (35). Die den griffen immanenten Widersprüche, die aus der subjektiven und gesellschaftlichen Konstruktion n Wirklichkeit resultieren(36), werden dabei ebenso wenig erfaßt wie die Kluft zwischen dem neren Wesen, der spezifischen Bedeutung und der äußeren Erscheinung von Objekten. Grundlage rmallogischer Wissensrepräsentation ist damit die Auffassung, daß sich Wirklichkeit, bzw. ssen über Wirklichkeit eindeutig determinieren und durch atomistische Strukturen abbilden ßt. Begriffe werden so zu Instrumenten, die im Rahmen verobjektivierter Denkprozesse ihre ezifische Funktion erfüllen. Sie weisen notwendigerweise stets präzise auf ein Designatum, h. auf ein zu bezeichnendes Objekt. Dabei wird jedoch lediglich die Struktur der Ausdrücke und rer Beziehungen zueinander analysiert, während die Betrachtung der Bedeutung von Begriffen, h. der Überprüfung, ob Begriffe auf je spezifische Objekte der Realität referieren, innerhalb rmallogischer Betrachtung unterlassen wird. Die Formale Logik ist eine Sprache, "in welcher le für das logische Schließen relevanten Ausdrücke nicht mehr mit jenen Mehrdeutigkeiten haftet sind, welche die betreffenden Ausdrücke unserer Alltagssprache besitzen" (37). Begriffe erden also im Zuge ihrer logischen Übersetzung "gereinigt", sowohl von den in ihnen enthaltenen idersprüchen als auch von der subjektspezifischen Bedeutungszuweisung. Während beispielsweise n der pragmatischen Semiotik der Sprecher, der sprachliche Ausdruck und die Bedeutung als elevante Elemente einer Begriffsbestimmung gelten, wird in den formallogischen Entwürfen diglich die syntaktische Konfiguration von Ausdrücken als relevant erachtet. Wenn auch die rmallogische Repräsentation in Teilaspekten gültige Modelle über isolierte Wirklichkeitsbereihe bilden kann, so erweist sich die formale Sprache bei der Transformation menschlichen Wissens n Formalstrukturen als wenig adäquat, insbesondere dann, wenn alltagssprachliche Begriffe in ie Verbalisierung von fachspezifischem Wissen einfließen. "Für präzise Begriffsbestimmungen ignet sich sie Alltagssprache nicht" (38).

as Wissen des Menschen ist aber nun gerade durch jene Aspekte gekennzeichnet, die sich durch ie formallogischen Strukturen nicht fassen lassen: der unmittelbare Bezug zum wissenden Subjekt ffenbart sich in jedem Begriff, der nicht lediglich als bloßes Designans eines realen Objekts ungiert, sondern dessen subjekt- spezifischer Bedeutungsgehalt ebenso immer mitgedacht werden uß wie der in jedem Begriff, in jeder Wortbedeutung offenbar werdende kulturelle Kontext.

immt man an, daß die formallogischen Ausdrücke als hinreichendes Abbild menschlicher Wissensinalte gelten, so entspricht diese Auffassung einem Bild von Wissen, nach dem es in verobjektierter Form dargestellt werden kann, ohne daß es seinen wesentlichen Sinngehalt verliert. Nun zielt aber gerade die KI-Forschung nicht auf die bloße Repräsentation von Faktenwissen, wo eine derartige Annahme zwar nicht hinreichend, aber doch zumindest nachvollziehbar wäre, sondern ihre Intention besteht ja darin, individuelles Wissen auf Maschinen zu übertragen. Individuelles Wissen aber ist nicht nur in hohem Maße geprägt vom "wissenden" Subjekt, sondern impliziert immer grundlegende Einsicht, d.h. Wissen über Hintergründe, Entstehungszusammenhänge, Kontexte

(indivdiual- und kulturspezifische) und immanente Intentionen. Im menschlichen Wissen offenbart sich somit immer auch ein Teil der ontogenetischen und phylogenetischen Entwicklung(39), die individuelle Geschichte ebenso wie das Gesamt der kollektiven Erfahrung, die eben zu je spezifischen Bedeutungszuweisungen führt. Selbst wenn menschliches Wissen im extremen Maße fachbezogen ist und vordergründig als abspaltbar vom sonstigen Wissen eines Menschen erscheint, so gründet auch die fachspezifische Interpretation von Phänomenen auf dem Eingebettetsein in subjektivem und allgemeinem Wissen.

Die Verwobenheit des Begriffs mit dem allgemeinen Umfeld, die in ihm enthaltene Fülle an subjektiven und kulturellen Bezügen, die Unmöglichkeit, das Singuläre ohne das Allgemeine zu begreifen, all dies wird in der Formalsprache nicht berücksichtigt, nimmt man doch hier gerade die Gültigkeit von strengen Zurodnungen und eindeutigen Trennungen als gegeben an. Die formale Sprache ist eine Objektsprache; nicht nur wird die bestimmende Funktion des Subjekts verkannt, sondern ebenso wird das historische und kulturelle Eingebundensein der Bedeutung von Ausdrücken als irrelevant betrachtet. So wird der Wahrheitsbegriff auf das Gegebene bezogen, die Hegel'sche Annahme, das Ganze ist das Wahre, tritt in den Hintergrund zugunsten eines Wahrheitspostulat, das sich am unmittelbar Existierenden orientiert.

Der Formalen Logik immanent ist das Streben nach formalen Kriterien wie Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit. Eine möglichst exakte Darstellung des jeweils zu Beschreibenden, die konsistente Zusammenstellung von bekannten Fakten und die Gültigkeit formaler Ableitungen formieren die Erkenntnissuche. Der Bezug zum klassischen Positivismus läßt sich unschwer herstellen. "Ideal der Erkenntnis ist demnach die vollständige und einfachste Beschreibung der Tatsachen... Dies wird erreicht, durch Ausschalten überflüssiger Wesenheiten, durch ausschließliche Verwendung prognostisch relevanter Begriffe, durch gesetzartig-funktionale Beschreibung und durch die mathematische Darstellungsform" (40). Die Repräsentation von Wissen in Computern wird diesen Kriterien entsprechend vorgenommen; Widerspruchsfreiheit beipielsweise stellt eine der grundlegenden Prüfsteine dar, an denen die Qualität einer Wissensbasis gemessen wird. Erklärungen werden auf kausale Erklärungen reduziert, Zusammenhänge wirken wie gesetzartige Verknüpfungen von Ereignissen. Selbst die im Zusammenhang mit der "nonmonotonic logic" entstandenen Konzepte der Integration von "default - values" bleiben dieser wissenschaftstheoretischen Position verhaftet, handelt es sich doch immer um konkrete Tatsachen, die zwar modifizierbar sind und somit den strengen formalen Kriterien der mathematischen Logik zuwider laufen, die aber dennoch eindeutig definierte, statische Ausdrücke darstellen. Die Abbildung menschlichen Wissens durch computeradäquate Formalismen läßt damit all jene Dimensionen unberücksichtigt, die hinter den bloßen Tatsachen liegen, durch welche sich aber gerade wissende Erkenntnis auszeichnen ließe. Die Annahme, man könne Wissen präzise beschreiben, bzw. nur das, was exakt darstellbar ist, sei überhaupt relevant, steht in enger Tradition zu philosphischen Aufassungen, die lediglich im Tatsächlichen, das sie vom bloß Eingebildeten oder Gedachten unterschieden, das Wahre sahen. Lediglich die bloßen Tatsachen können dieser Position gemäß Gewißheit beanspruchen und sind damit vom Unentschiedenen zu trennen. Habermas (41) verweist in diesem Zusammenhang auf Comte, der "das Genaue im Unterschied zum Unbestimmten (le precis - le vague), das Nützliche im Gegensatz zum Eitlen (l'utile - l'oiseux), und schließlich das, was relative Geltung beansprucht, im Gegensatz zum Absoluten (le relatif - l'absolu)" setzte. Am hier deutlich werdenden Antagonismus zwischen Faktischen und Gedachten wird offenbar, daß mit der Transformation menschlichen Wissens in Computersysteme das Gedachte - und Wissen ist als mentale Rekonstruktion von Wirklichkeit zu begreifen - zum Faktischen erklärt wird. Die subjektive Gestaltung der Wissensinhalte tritt, ebenso wie ihre kulturelle Einbettung gegenüber dem bloßen Gegenstand zurück, der als verobjektiviertes Wissen in Computern verankert wird.

Die Implementation von Wissen findet somit lediglich mit dem Ziel technischer Verfügbarkeit statt, ein darüber hinaus reichendes Interesse, welches Wissen als traditionsgebunden und sinnbezogen begreift, existiert nicht. Indem sich die KI-Forschung als Wissenschaftszweig offenbart, der nicht nur ein streng atomistisches Realitätsverständnis hat, sondern diese Sichtweise auch auf das menschliche Abbild dieser Realität überträgt, offenbart sich das dahinter stehende Menschenbild, in dem letztlich die mentalen Vorgänge als abkoppelbar vom denkenden und wissenden Subjekt begriffen und als instrumentelle Vernunft maschinell verfügbar gemacht werden. Und so läßt sich der Versuch, menschliches Wissen auf Computer zu übertragen, in der langen Tradition von Bemühungen sehen, naturwissenschaftliche Sichtweisen in die Analyse des menschlichen Geistes hineinzutragen und die Stellung des erkennenden Subjekts immer weiter einzuschränken. Damit jedoch werden Computerwissensbasen stets Defizite vorweisen, die sich aus der Nichtintegrierbarkeit menschlicher Erfahrung ergeben und die selbst in hochabstrakten Gebieten auftreten werden. "Dem erlebenden Subjekt ist der Zugang zur Wirklichkeit freigegeben;

der Resonanzboden aller vorwissenschaftlich akkumulierten Erfahrungen schwingt mit" (42). Die Loslösung des Wissens vom wissenden Subjekt ist demnach gleichzusetzen mit einer fundamentalen Reduktion dieses Wissens. Durch die blanke Darstellung von Tatsachen, die ihrer Tradition, ihrem kulturellen Kontext und ihre subjektspezifischen Bedeutungszuweisung enthoben wurden, werden sie ihres Sinngehalts beraubt, der sie letztlich erst zu dem je Besonderen macht, als das sie erscheinen. "Es gibt überhaupt keine Tatsachen an sich, sondern das, was wir Tatsachen nennen, ist immer schon durch die Apperzeption mitbestimmt, und zwar nicht die reine transzendentale, sondern die konkrete des geschichtlichen Subjekts" (43).

9.3 Das menschliche Denken

Immer wieder wird innerhalb der KI-Forschung Denken reduziert auf die Anwendung von Regeln oder Verfahren. Ja selbst das analoge Denken, dessen maschinelle Simulation bislang nicht gelang, glaubt man auf Regeln zurückführen zu können, die zwar bislang nicht bekannt, irgendwann einmal jedoch erforscht sein würden(44). Die Gleichsetzung menschlichen Denkens mit Suchprozessen auf der Basis von Regelanwendungen negiert jedoch Phänomene, die als typisch erachtet werden müssen für diese grundlegende menschliche Fähigkeit: blitzartige Einfälle, intuitive Einsicht, Erkennen von Analogien oder Ähnlichkeiten, die Fähigkeit, Strukturveränderungen wahrzunehmen und entsprechend darauf zu reagieren sowie die Ambiguitätstoleranz, d.h. der Umgang mit Mehrdeutigkeiten; all diese menschlichen Fähigkeiten lassen sich nicht hinlänglich mit dem KI-Modell des Denkens erklären und machen verständlich, weshalb bislang keine "denkenden Maschinen" geschaffen werden konnten. Im Folgenden soll der Versuch gemacht werden, einige grundsätzliche Fragen zum menschlichen Denken aufzuwerfen, die sich als Folge einer derart reduktionistischen Sichtweise förmlich aufdrängen.

Das cartesianische "Ich denke, also bin ich" koppelt die menschliche Existenz unmittelbar an die Fähigkeit zu denken, sieht das Denken gar als Voraussetzung des menschlichen Seins. Ist dieses wirklich apriori mit dem Denken verwoben, ist das Selbst-Bewußtsein des Menschen vom Denken abhängig, bildet sich seine Persönlichkeit, sein Ich überhaupt erst durch den Vorgang des Denkens? Nähme man an, daß Denken als ontologische Eigenart des Menschen zu begreifen ist, erübrigte sich die Frage, ob Maschinen überhaupt jemals denkenden Entitäten gleichzusetzen sind. Faßt man jedoch das Denken als nicht gattungsgebunden auf, sondern bezeichnet damit lediglich bestimmte mentale Prozesse, so wäre eine denkende Maschine grundsätzlich vorstellbar. Überlegungen, ob denkende Maschinen, wenn auch nicht heute, dann irgendwann in entfernterer Zukunft existieren können, erfordern eine genauere Reflexion des Denkbegriffs.

Die existentielle Bedeutung des Denkens für das menschliche Selbstempfinden ist offenbar, begreift sich doch der Mensch erst, indem er sich denkend erfaßt, sich denkend gegenübertritt, die Besonderheit seines Ich mental erst versteht. Doch werden mit dem Begriff des Denkens nicht nur jene geistigen Prozesse der Selbsterkenntnis, sondern darüberhinaus verschiedene kognitive Akte beschrieben. So variieren die Definitionsversuche von denjenigen, die jeden geistigen Vorgang als Denken etikettieren bis zu Erklärungen, die mit dem Begriff des Denkens lediglich logische Prozesse assoziieren. Daher soll zunächst der Versuch einer Begriffsbestimmung vorgenommen werden, um die Diffusität der Bezeichnung zu mindern. Dabei dient die Umgangssprache als Ausgangspunkt für den Versuch, die allgemeinen Assoziationen und die Umschreibungen des Denkens als Indiz für seinen Sinngehalt zu betrachten.

Wahrig's Deutsches Wörterbuch (45) nennt aufschlußreiche Synonyme für das Wort 'denken': "geistig arbeiten, urteilen, überlegen, glauben, meinen, einbilden, annehmen, sich vorstellen, gesonnen sein, beabschtigen, gedenken, sich im Geiste vorstellen, im Sinn haben, ersinnen". Bemerkenswert ist die Fülle der als sinnverwandt angesehenen Bezeichnungen, die der Komplexität dieses geistigen Prozesses entsprechen. Dagegen ist dem Wort denkfähig nur die Erklärung "fähig, klar und logisch zu denken" und dem Wort 'Denklehre' lediglich die Umschreibung "Logik" zugeordnet. Die Diskrepanz zwischen der Fülle an Bezeichnungen, die mit dem allgemeinen Begriff des Denkens verbunden werden, und dem, was unter dem individuellen Vermögen, denken zu können, bzw. seiner theoretischen Erfassung verstanden wird, ist offensichtlich und scheint Ausdruck dafür zu sein, wie eng der Denkbegriff gefaßt wird, wenn es um seine individuelle Ausprägung oder seine theoretische Beschreibung geht. Dieses eingeschränkte Begriffsverständnis führt dazu, daß innerhalb der Künstlichen Intelligenz von denkenden Maschinen gesprochen werden kann, wobei hier das Denken eingegrenzt ist auf Problemlösungen und logisches Schlußfolgern. Auffällig ist, daß der "common sense", d.h. die Umgangssprache, eine komplexere Auffassung offenbart als dies innerhalb vieler wissenschaftlicher Sichtweisen der Fall ist.

Bekanntermaßen tritt bei der logischen Betrachtung des Denkvorgangs das denkende Subjekt zurück gegenüber dem reinen Denkvorgang, es scheint hier, als sei der Denkprozeß ein An-Sich-Seiendes, vom involvierten Individuum unabhängiges Geschehen. Während aber innerhalb der KI-Forschung die Auffassung vorherrscht, daß die Implementation der strengen Formalregeln zur logischen Ableitung eine adäquate Methode für die Schaffung von denkenden Maschinen (46) darstellen kann, erweitert beispielsweise Peirce diesen Begriff: für ihn erstreckt sich der "Reasoning"-Prozeß auf die Argumentationen, mit denen Aussagen über die Realität gewonnen werden können (47) (48). Dieser Bezug zur Realität, das Abwägen des Gedachten gegenüber dem Faktischen, die Integration des logischen Schlusses in die individuelle Auseinandersetzung mit der Umwelt, weisen darauf hin, daß der logische Denkprozeß nie für sich allein noch abstrakt aufgefaßt werden kann. Die Partizipation des Subjekts ist dem Denken unmittelbar immanent. Erst das Subjekt schafft jene Abstraktion vom bloß Gegebenen, durch welche der Denkprozeß sich auszeichent. Nicht die bloße mentale, sich oft in der Sprache ausdrückende Wiedergabe des Realen ist als Denken zu kennzeichnen, vielmehr ist es die Loslösung von den unmittelbaren Tatsachen, der Versuch, von der rein phänomenologischen Ebene sich trennend das Wesentliche eines Gegenstandes zu begreifen; "denn niemand denkt wirklich, der nicht von dem abstrahiert, was gegeben ist, der nicht die Fakten auf die Faktoren bezieht, die sie hervorgebracht haben, der nicht - in seinem Geiste - die Fakten auflöst. Abstraktheit ist das innerste Leben des Denkens, das Wahrzeichen seiner Authentizität" (49). Abstraktion bedeutet hier jedoch nicht, daß sich das Denken vom erkennenden Subjekt abkoppeln ließe, vielmehr impliziert die Loslösung vom bloß Gegebenen ja gerade ein Subjekt, daß dem Allgemeinen ein Besonderes entgegensetzt und damit die Fassade verobjektivierter Erscheinungen aufbricht. In den umgangssprachlichen Synonymen des Denkbegriffs wird diese unerläßliche Beteiligung des Subjekts offenbar.

Gerade diese subjektive Gestaltung des Denkvorgangs bleibt unberücksichtigt in der Annahme, das menschliche Denken ließe sich in Computern abbilden. Man betrachte beispielsweise das Synonym 'urteilen': ein Urteil kann nur fällen, wer eine Haltung einnimmt und Einstellungen gewonnen hat bzw. diese in das Urteil einfließen läßt, d.h. eine Person mit einer individuellen Geschichte und ontogenetisch begründeten Wahrnehmungen und Erfahrungen. Urteile setzen eine reflexive Auseinandersetzung mit der zu beurteilenden Sache voraus, die erst auf der Basis der subjektiven Erkenntnis von Wirklichkeit stattfinden kann. Trennt man die Urteilsfindung vom urteilenden Subjekt, wie es, wenn auch in sehr rudimentärer Form z.B. durch die Sicherheitsfaktoren in medizinischen Expertensystemen stattfindet, erscheint es als objektivierte Form, als Gesetz und wird als solches Abstraktum wirksam. "An die Stelle der über die gegebene Wirklichkeit ausgesprochenen Urteile treten Sätze, die die allgemeinen Formen des Denkens, die Gegenstände des Denkens und die Beziehungen zwischen dem Denken und seinen Gegenständen bestimmen. Das Subjekt des Denkens wird zur reinen und allgemeinen Form der Subjektivität, aus der alle Besonderheiten entfernt sind"(50). Während durch die unmittelbare Beteiligung des Subjekts im Denkprozeß das Besondere mit dem Allgemeinen kontrastiert und sich in diesem Antagonismus erst das Wahre offenbart, wird durch die technische Abstraktion vom Besonderen das Allgemeine alleingültig. Erst die Bezugsetzung zum sinnerzeugenden Subjekt erhellt ja die eigentliche Bedeutung der Begriffe, durch welche das Denken charakterisiert ist. Losgelöst vom individuellen Menschen verliert der bloße Denkakt seinen je spezifischen Sinngehalt, verkommt zur abstrahierten Form. Erst die Vermittlung zwischen allgemeiner Objektivität und unmittelbarer Erfahrung schafft jene Form geistigen Agierens, die für das menschliche Subjekt charakteristisch ist.

Die Form der Vorläufigkeit oder Unbestimmtheit, wie sie für das menschliche Denken typisch ist und wie sie sich in den Synonymen 'glauben', 'meinen', 'einbilden', 'annehmen' niederschlägt, offenbart wiederum die Untrennbarkeit des mentalen Aktes vom denkenden Menschen. Das ungewisse Denken impliziert in besonderem Maße ein teilnehmendes Individuum, ist es doch eben jenes subjektive Sein, das im Ungewissen lebt, ja mehr noch schafft die subjektive Erfahrung im speziellen und die allgemeine Situation des Menschen in der Auseinandersetzung mit seiner Umwelt erst Unbestimmtheit. Überzeugungen, Meinungen und Annahmen sind ohne die involvierte Person sinnentleerte Begriffe ohne eigentlichen Bedeutungsgehalt, da die den Bezeichnungen spezifische Bedeutung unmittelbar subjektgebunden ist, eine subjektive Anteilnahme an einem äußeren Objekt oder Geschehen Bedingung der Begriffsbildung ist. Das ungewisse Denken ist in seiner spezifischen Ausprägung untrennbar mit dem bewußtseinsmäßig in diesen Prozeß involvierten Subjekt verbunden, gewinnt ja gerade durch die individuelle Besonderheit des gedanklichen Prozeßes erst die besondere Ausprägung, die sich in der Bezeichungsform widerspiegelt.

Ganz wesentlich für das menschliche Denken ist dessen intentionaler Bezug. So wird, bezugnehmend auf Freud, der diesen Begriff prägte(51), Denken mit "Probehandeln" gleichgesetzt, also mit der mentalen Antizipation von Handlungen(52). Im Innehalten vor einer real zu vollziehenden Handlung

offenbart sich ein wesentlicher Aspekt des menschlichen Denkens, indem das denkende Subjekt, sich an seinen individuellen Erfahrungen orientierend, die potentiellen Folgen einer geplanten Handlung vorausdenkt. So umfaßt Denken auch den intentionalen Bereich, der durch das Gesamtgefüge der menschlichen Praxis ebenso determiniert ist wie durch die spezifische Geschichte eines Subjekts. Gedankliche Prozesse, die ein Vorhaben ausdrücken, eine Idee, die zwar noch im gedanklichen Entstehungsprozeß begriffen sind, doch schon das reale Handeln antizipieren, sind damit an die menschliche Existenz, das Eingebettetsein eines Individuums in die historische Praxis gebunden. Innerhalb der KI-Forschung wird das intentionale Denken oftmals mit dem Problemlösen gleichgesetzt. Diese operationalistische Auffassung verkennt jedoch, daß die mentale Antizipation von Handlungen deren realen Vollzug impliziert, d.h. dass diese nicht als bloße geistige Operation begriffen werden können, sondern dass zudem das subjektive Agieren Effekte in der äußeren Welt hervorruft, Wirklichkeit demnach als beeinflußbar durch eigene Handlung erscheint.

Obwohl das menschliche Denken in seiner Außenrepräsentanz überwiegend sprachlich vermittelt wird, stellt das vorstellungsmäßige Denken im Gesamt der mentalen Vorgänge einen wesentlichen Teilaspekt dar. Die Imagination, das 'sich im Geiste vorstellen', bezeichnet den gedanklichen Prozeß, der durch die Fülle von Abbildungen der realen Welt im menschlichen Bewußtsein gekennzeichnet ist, d.h. die Widerspiegelung des äußeren Seins im individuellen Geist. Das bewußtseinmäßige Abbild der Realität stellt wohl eine wesentliche Grundlage aller Denkvorgänge dar, die phylo- und ontogenetische Grundlage der menschlichen Vorstellungskraft und der operationalen Denkfähigkeit(53). Es erscheint als außerordentlich fragwürdig anzunehmen, daß sich diese Aspekte des menschlichen Bewußtseins, in denen sich Individual- und Menschheitsgeschichte widerspiegeln, ohne letzte Rudimente des atavistischen Substrats in das rein operationale Denken transformierten. So bleiben Restbestände des phylo- und ontogenetisch überwundenen Bewußtsein immer haften im sprachlichen und im subjektiven Bedeutungsumfeld der einzelnen Phänomene. Menschliche Erkenntnis, und als diese ist letztlich das Denken zu begreifen, bleibt eben nicht der bloßen Beschreibung des Gegebenen oder der operationalisierten Problemlösung verhaftet, es ist dagegen untrennbar verknüpft mit der Imagination, verkörpert die Vorstellung doch das körpernahe Erleben, durch welches sich menschliches Sein als spezifisches auszeichnet.

Die Abstrahierung geistiger Prozesse vom denkenden Subjekt gilt seit langem schon als legitim, äußert sich vor allem im Versuch, Denkvorgänge zu formalisieren. Die KI-Forschung entspricht in ihrem Bemühen um die Konzeption einer maschinellen Vernunft damit einer allgemeinen Tendenz, verfestigt diese lediglich durch die technologische Tranformation. Dahinter verbirgt sich die Ansicht, nach der das sprachlich Faßbare als alleiniger Ausdruck des Denkens aufzufassen sei. Diese Sichtweise wirkt zurück auf die Wirklichkeitswahrnehmung. Bryan Johnson(54) weist darauf hin; er fordert, man solle die Bedeutung von Wörtern über seine Sinne wahrnehmen, statt die Wirklichkeit im Sinne der Worte wahrzunehmen und damit zu einem völlig verkürzten Blick über die Realität zu kommen. Wenn wir die Mannigfaltigkeit unserer Sinneseindrücke sprachlich zu fassen versuchen, ist dies notwendigerweise mit einer Reduktion verbunden, da der reine Begriff nicht die Fülle unserer sinnlichen Wahrnehmungen trifft. Und so verbindet jeder Mensch mit dem Begriff eines Objektes unbewußt die Sinneseindrücke, die er bei Begnungen mit dem Objekt erfuhr und die in seinem Gedächtnis zumindest als Spuren verankert sind und dem jeweiligen Wort eine spezifische, wortübergreifende Bedeutung verleihen. Beispielsweise verbinden wohl die meisten Menschen mit dem Wort 'Rose' unmittelbar den Duft, die möglichen Farben, die Tatsache, daß eine Rose Stacheln besitzt, die Erfahrung, daß diese Schmerzen zufügen können, Assoziationen an den Symbolgehalt der Rose als Zeichen der Verehrung, Liebe..., Erinnerungen an subjektive Erlebnisse mit Rosen, entsprechende, oftmals lediglich diffuse Emotionen, die mit dem Wort Rose assoziiert werden etc... . Dieses sowohl kulturell als auch individuell geprägte Bedeutungsumfeld eines Wortes tangiert Teilbereiche des Denkens, die lediglich vermittelt in der Sprache zu Tage treten. Der Sinngehalt von Begriffen, der für jedes Individuum nuanciert unterschiedlich ist, wird in der Formalsprache negiert, obwohl das Bedeutungsumfeld entscheidend ist für die Art des Denkens, der Urteilsbildung, des Entscheidungsprozesses, der Vorstellungskraft, der Überzeugung und der Intention. Es ist so dringlich festzuhalten, daß die Begriffe auf die Objekte der Realität nicht umkehrbar eindeutig referieren, sondern daß jedem Begriff, jeder Bezeichnung ein subjektives Moment innewohnt, das dem Wort eine Bedeutung zuweist, die über den bezeichneten Gegenstand hinausreicht. Da sich das Denken aber zunächst auf die Objekte der Realität richtet und diese reflektierend zu erfassen sucht, trägt der denkende Mensch eben jenes subjektive Moment mit in den Denkprozeß hinein. Die Betrachtung des Denkens als eines subjektunabhängigen, geistigen Prozeßes, wie er in der formalen Logik letztlich vorausgesetzt wird, ist somit inadäquat, zumindest bezogen auf die Zielsetzung, damit menschliches Denken abzubilden. Aber noch ein weiteres Moment wird bei der Reduktion des Denkens auf das logische Schlußfolgern

übersehen. Denn nicht nur die sinnliche Wahrnehmung und das subjektive Bedeutungsumfeld lassen die Annahme eines reinen Geistes nicht zu. Auch der Vorgang des Denkens selbst schließt die Reduktion auf Logik aus. Denken setzt Abstraktion vom Gegebenen voraus. Der Denkende kann sich somit nicht allein auf das beziehen, was ihm wirklich erscheint, was ihm konkret gegenübertritt, sondern er muß die Tatsachen unter Berücksichtigung der Zustände reflektieren, die sie hervorgebracht haben. Denken impliziert also, das Gegebene auch immer unter Berücksichtigung seiner Entstehungsbedingungen zu reflektieren. Dies bedeutet, daß die bloßen Tatsachen aufgelöst und in ihrer negativen Umkehr gedacht werden müssen(55). Indem aber nicht nur das Reale, sondern auch das Mögliche in der gedachten Verneinung des Konkreten gedacht wird, ist das Denken nicht mehr loslösbar von der Praxis und vom handelnden Subjekt. Im Gegensatz zu den Logikern, die den reinen Geist, das von jeglicher Praxis losgelöste Denken in den Vordergrund ihrer Betrachtungen stellen, ja diesem sterilen geistigen Prozeß alleine das Etikett 'denken' zuweisen, wird Denken hier nicht vom gedachten oder praktizierten Handeln gelöst. Die Freud'sche Bezeichung vom Denken als 'Probehandeln' drückt dies schon aus, daß nämlich der Mensch beim Denken von der Intention des möglichen Handelns motiviert ist, daß die gedankliche Erprobung von Praxis wesentlich zum Denken gehört. Die gedankliche Antizipation des Handelns setzt aber eine wertende Haltung gegenüber den Objekten voraus. Eine indifferente, neutrale Haltung, wie sie von den Logikern vorausgesetzt wird, ist nicht mehr möglich in dem Moment, wo sich das Subjekt aktiv mit seiner Umwelt auseinanderzusetzen gedenkt. An diesem Punkt ist der Rückbezug möglich auf die zu Anfang formulierte Frage nach dem Zusammenhang von Persönlichkeit und Denken. In dem Moment, wo man vom Bild des Denkens als reinem geistigen Prozeß abweicht, und stattdessen Denken begreift als Element der individuellen Auseinandersetzung mit dem Gegebenen, bildet sich die Persönlichkeitsstruktur des Individuum in jedem Moment weiter, wo es sich mit seiner Umwelt gedanklich auseinandersetzt; die Entwicklung von Identität ist somit unmittelbar an die gedankliche Erfassung des Realen gebunden und manifestiert sich in der urteilenden, wertenden geistigen Haltung gegenüber der Wirklichkeit. Denken erscheint unter diesem Blickwinkel als gattungstypische Form der geistigen Entwicklung und der damit unmittelbar verknüpften Interaktion mit Menschen und Umwelt; es offenbart sich damit als ontologische Besonderheit des Menschen.

9.4 Abschließende erkenntnistheoretische Überlegungen

Wenn auch die Gleichsetzung menschlicher Intelligenz mit der Anwendung formaler oder heuristischer Regeln ungerechtfertigt zu sein scheint, so ist dennoch die theoretische Annahme prinzipiell möglich, daß man menschliches Verhalten mit derartigen Regeln formalisieren und damit maschinell simulieren kann (56). Der Glaube an eine mögliche maschinelle Reproduktion intellektueller Fähigkeiten von Menschen geht einher mit der Überzeugung, daß damit eine formalistische Theorie über menschliche Intelligenz geschaffen werden könne. Dabei wird jedoch verkannt(57), daß die Realisierung maschineller Kompetenz, selbst wenn sie gelänge, noch keine Erklärung darstellen würde über die Struktur der menschlichen Intelligenz und ebensowenig bedeutete, daß menschliche und maschinelle Fähigkeiten auf den gleichen inneren Prozessen basierten.

Man muß demnach differenzieren zwischen der Simulation bestimmter Fähigkeiten, die eine äußere, sich auf die Verhaltensebene beziehende Kongruenz von menschlicher und maschineller Kompetenz beinhalten, und der strukturellen Isomorphie derartiger Prozesse. Das erkenntnistheoretischen Problem, das hier deutlich wird, besteht darin, daß die Äquivalenz der phänomenologischen Ebene noch nicht gleichbedeutend ist mit der Vergleichbarkeit der wesensmäßigen Struktur. Konkreter ausgedrückt: wenn ein Computersystem gleiche kognitive Resultate produziert wie ein Mensch, so impliziert dies nicht, daß die zugrundeliegenden Prozesse der Problemlösung bei Mensch und Maschine äquivalent sind.

Searle(58) verdeutlichte dies an einem berühmt gewordenen Beispiel: Ein Mensch, des Chinesischen unkundig, wird mit chinesischen Woertern konfrontiert und erhält Regeln, die ihm ermöglichen, die Woerter sinnvoll zu kombinieren. Trotz völligen Unverständnisses der chinesischen Sprache ist er somit dazu in der Lage, Sätze zu konfigurieren, die von einem Außenstehenden nicht von jenen unterschieden werden können, die von einer chinesisch sprechenden Person gebildet wurden. Es entsteht somit der äußere Anschein von Verständnis, ohne daß dies tatsächlich existierte. Ähnliches gilt für Computersysteme: sie manipulieren uninterpretierte, formale Symbole nach vorgegebenen Regeln, doch impliziert diese Fähigkeit nicht, daß sie über Verständnis verfügen. Das bloße Funktionieren oder das Hervorbringen korrekter Lösungen bedeutet demnach nicht, daß Maschinen die vollzogenen Prozesse verstehen.

An diesem Punkt wird die grundsätzliche Schwierigkeit offenbar, daß Intelligenz oder Verständnisfähigkeit lediglich auf der Verhaltensebene beurteilbar sind. So ist kaum entscheidbar, ob es

sich bei maschinellen Prozessen um Simulationen von kognitiven Akten handelt oder ob diese bereits zu letzterem geworden sind. Weizenbaum schlägt eine mögliche Zugangsweise vor, indem jene Aspekte als Entscheidungskriterien benutzt werden sollen, wo sich Menschen von Maschinen unterscheiden. Damit läßt sich zwar die Isomorphie von menschlicher und maschineller Kognition eingrenzen, nicht jedoch die grundsätzliche Frage beantworten, ob eine Maschine Bewußtsein besitzt, da es sich lediglich um eine andere Bewußtseinsform gegenüber der des Menschen handeln könnte.

Ähnlich schwierig ist die Einschätzung, inwieweit die softwaremäßige Nachahmung neuronaler Prozesse, etwa die Simulation der Neubildung dendritischer Verknüpfungen, die ja theoretisch denkbar ist, den materiellen Modifikationen im menschlichen Gehirn äquivalent ist, somit also die Unterschiede im materiellen Substrat von Gehirn und Maschine kein Kriterium für Grenzen maschineller Fähigkeiten darstellten. Hier muß jedoch berücksichtigt werden, daß Simulationen Nachahmungen sind, die eine Isomorphie mit dem Abgebildeten nicht notwendigerweise implizieren. So können die der Simulation zugrundeliegenden Strukturen gegenüber den realen völlig different sein und dennoch ähnliche Erscheinungen hervorrufen, obwohl ihnen wesensmäßig unterschiedliche Prozesse zugrundeliegen. Es stellt sich unmittelbar die Frage, ob man von isomorphen Vorgängen sprechen kann, wenn diese lediglich phänomenologisch äquivalent sind, oder ob dies erst zulässig ist, wenn eine ontologische Gleichartigkeit angenommen werden kann. Betrachtet man die Grundlage entsprechender Einschätzungen, so fällt unmittelbar ins Auge, das sich derartige Bewertungen zumeist auf die Verhaltensebene beziehen, ja beziehen müssen, da die wesensmäßige Erfassung oftmals nicht möglich ist.

Ein damit zusammenhänges Problem stellt die Theoriebildung mit Computern dar, die einen grundlegenden Unterschied zur bisherigen Theoriekonzeption beinhaltet. Während eine Theorie bislang ein abstraktes Modell des menschlichen Verhaltens darstellte, suggeriert die maschinelle Simulation eine Isomorphie zwischen menschlicher und maschineller Kognition, weil die Ebene des wahrnehmbaren Verhaltens, d.h. die konkret beobachtbaren Resultate, gleich sind. Das Problem besteht demnach darin, daß zwar eine formale Theorie der Intelligenz möglich sein kann, diese jedoch die reale Praxis intelligenten Verhaltens nicht zu erklären vermag. So können zwar beispielsweise formale Regeln für Sprachäußerungen identifiziert werden, jedoch erklären diese nicht die unendliche Anzahl möglicher Sprachäußerungen(59). Und dies läßt sich ganz allgemein auf die menschliche Kognition und ihre individualspezifische Ausprägungen übertragen. Dieser Annahme hält Turing entgegen, "daß es prinzipiell unmöglich sein mag, eine Menge von Regeln dafür anzugeben, was ein Mensch in allen möglichen Fällen tun sollte. Er hält jedoch daran fest, daß es prinzipiell möglich sein muß, eine Menge von Regeln zu finden, die beschreiben, was ein Mensch tun würde" (60).

Maschinen fehlt jedoch diese praktische Intelligenz. Sie sind insofern "existentiell" dumm, als sie nicht mit speziellen Situationen umgehen müssen. "Sie können Mehrdeutigkeit und das Verletzen von Regeln nur akzeptieren, wenn die Regeln zur Behandlung der Abweichungen so vollständig spezifiziert worden sind, daß die Mehrdeutigkeit aufgehoben ist." (61). Wollte man demnach die menschliche Praxis einer Formalisierung unterziehen, wie es für die Simulation menschlicher Intelligenz durch Computer vonnöten wäre, bedürfte man einer formalen Theorie der Praxis, wie sie bereits von Leibniz für möglich erachtet wurde. Damit einher ginge jedoch eine Negation der Differenz zwischen theoretischem und praktischem Verstehen, d.h. eine Reduktion von Verständnis auf einen subjektfreien abstrakten Formalismus, der das verstehende, handelnde Subjekt außer Acht läßt. Formalisierung setzt immer Abstraktion vom Konkreten, Objektivation des subjektiv Differierenden voraus, da nicht für alle potentiellen Ausprägungen und Ausdruckformen eindeutig definierbare Regeln oder Beschreibungen determiniert werden können. Die Erfassung der kontextuellen Bedeutungen und das Situationsverständnis von Subjekten, grundlegende Bedingungen menschlichen Verstehens, könnten in einer Formalisierung menschlicher Praxis nicht berücksichtigt werden, da sie sich einer eindeutigen und vollständigen Beschreibung entziehen, ja dieser widersprechen, da es sich um mehrdeutige, nichtobjektivierbare Momente des menschlichen Geistes handelt. Wittgenstein (62) wies bereits darauf hin, daß eine Formalisierung der Praxis von kognitiven Fähigkeiten, in diesem Fall der Sprache, immer unzureichend bleiben muß, da Menschen im Allgemeinen die Sprache nicht nach formalen Regeln benutzen, sondern eher phänomenologischen Beschreibungen folgen, wie sie sich auch für das Erlernen von Sprache als entscheidend herausstellten. Das strikte Befolgen von Regeln scheint - im Gegensatz zur Annahmen innerhalb der KI-Forschung - eher untypisch für menschliche Praxis zu sein. Wittgenstein empfand es gar als Absurdität, menschliches Verhalten lediglich auf Regeln zurückzuführen, da er als Folge einer derartigen Beschreibung einen unendlichen Regress von Regeln annahm. Die Unendlichkeit von Interpretationsmöglichkeiten einer konkreten Situation wird erst durch die praktische Situation

begrenzt, d.h. durch die Einschätzung des Menschen, der auf der Basis seines umfassenden Wissens und seiner Erfahrung Phänomenen ihre kontextuelle Bedeutung zuweisen kann.

Es ist theoretisch denkbar, zur Umgehung dieser Problematik einen letzten gemeinsamen Kontext anzunehmen, wie es beispielsweise Weizenbaum für die Kultur annimmt. Doch negiert eine derartige Annahme die Tatsache, daß Kultur kein objektivierbares Konglomerat aus Einzelkontexten darstellt, sondern Ausdruck unterschiedlicher subjektiver Wirklichkeitsinterpretationen ist. Der Stellenwert des bewertenden und bedeutungszuweisenden Subjekts für das, was unter dem Begriff Kultur subsumiert ist, wird in einer derartigen Konzeption nicht berücksichtigt. Erst die Annahme einer dialektische Verwobenheit von Individuum und Kultur (63) stellt ein adäquates theoretisches Konzept dar, mit dem sowohl die Bildung der Kultur durch individuelle Handlungen und Einstellungen als auch die des Subjekts durch den kulturellen Überbau in ihren komplexen Vernetzungen wahrgenommen wird. Damit wird deutlich, daß eine theoretisch denkbare Strukturierung des kulturellen Kontextes weder realisierbar ist noch eine hinreichende Bedingung für Verständnis wäre. Erst die subjektive Erfahrung, die sich aus der individuellen Praxis innerhalb der menschlichen Kultur ergibt, ermöglicht Einschätzung und sinnhafte Bedeutungszuweisung und ist damit die Ursache für die menschlichen Fähigkeit, ohne starre Regeln in der mannigfaltigen Umwelt sich zurechtfinden zu können. "Ohne ein besonderes Interesse, ohne eine besondere Orientierung, die uns die Auswahl und die Interpretation erleichtern, stehen wir wieder der Unendlichkeit bedeutungsloser Fakten gegenüber, der wir entfliehen wollten" (64).

Betrachtet man die nunmehr auf verschiedenen Ebenen deutlich gewordene Begrenztheit dessen, was mit Computern möglich zu sein scheint, werden verschiedene Implikationen offenbar, die letztlich weitreichende soziokulturelle Folgen nach sich ziehen können. Weizenbaum (65) wies bereits auf die Instrumentalisierung kognitiver Fähigkeiten hin, die zwar in der Tendenz immer schon beobachtbar war, jedoch durch die neuen Computersysteme eine deutliche Verstärkung erfährt. "Bedeutung" ist "völlig in Funktion transformiert worden. Die Sprache und damit auch die Vernunft ist zu nichts anderem gemacht worden als zu einem Instrument, mit dem die Dinge und Ereignisse in der Welt beeinflußt werden können" (66). Die Kritik von Vertretern der Frankfurter Schule, wie etwa Marcuse, Adorno und Horkheimer, die bereits in den Fünfziger Jahren eine kritische Position gegenüber der zunehmenden Operationalisierung des menschlichen Denkens bezogen, gewinnt mit den KI-Systemen eine neue Aktualität: "Die Begriffe wollen nicht mehr Qualitäten der Sache als solcher ausdrücken, sondern dienen einzig noch zur Organisation von Wissensmaterial für die, welche geschickt darüber verfügen können"..."Jeder Gebrauch von Begriffen, der über ihre rein instrumentale Bedeutung hinausgeht, verfällt dem Verdikt, er sei dem Aberglauben verhaftet" (67). Und obwohl das Bewußtsein der Menschen immer schon Zwängen unterworfen wurde, die es seiner Eigenart berauben wollten, und Denken immer schon in eindimensionale Bahnen gelenkt wurde, um Kritik und Antizipation zu unterdrücken, erfährt dieses Bestreben im Zuge dieser Computerentwicklungen eine neue Qualität, die es um so bedenklicher erscheinen lassen hinsichtlich der Folgen für die menschliche Kognition. Was von Horkheimer noch als negative Zukunftsvision angeprangert wurde, ist heute Realität geworden, daß nähmlich das "Denken selber aufs Niveau industrieller Verfahrensweisen gebracht" worden "und zu einem Stück der Produktion geworden" ist (68). Und so besteht die Gefahr, daß sich im Zuge einer weiten Verbreitung dieser neuen Computersysteme die Entfremdung fortsetzt bis ins Innerste der Gedanken. Die Elimination der Kluft zwischen dem Tatsachlichen und dem Gedachten, zwischen Wesen und Erscheinung, beraubt den Menschen um die letzten Formen kontextüberschreitenden Denkens, die ihm bislang immer noch, wenn auch zumeist rudimentär, blieben. "Im Ausdruck dieser Denkgewohnheiten verschwindet allmählich die Spannung zwischen Erscheinung und Wirklichkeit, Faktum und Faktor, Substanz und Attribut" (69). Während so die bisherige Gesellschaftsstruktur auf dem Verhältnis basierte, das der Mensch zu den Dingen hat, kann sich diese zunehmend dahingehend verändern, daß die Relation des Menschen zu seinem Bewußtsein, d. h. zu seinen kognitiven Fähigkeiten als deren neues Fundament zu gelten hat. Indem aber nunmehr unmittelbar Einfluß genommen werden kann auf das Wissen und damit auch das Denken des Menschen, indem ihm Äquivalentes in mechanisierter Form gegenübersteht, wird dieses unmittelbar in Regie genommen. Durch diese gesellschaftliche Integration wird Wissen zur Ware und gerät damit auch zur Totalität(70). Es wird in der Formalisierung dem Ideal der Widerspruchsfreiheit unterworfen und damit seiner Kraft, seiner Substanz beraubt. Es wird verwertungsgerecht gestaltet, wobei die spätere Anwendung über seine innere Struktur entscheidet. Unberücksichtigt bleibt dagegen die an das Subjekt gebundene Form der Erfahrung, die ihm erst seine besondere Bedeutung verleiht. "Erfahrung, die Kontinuität des Bewußtseins, in der das Nichtgegenwärtige dauert, in der Übung und Assoziation im je Einzelnen Tradition stiften, wird ersetzt durch die punktuelle, auswechselbare und ephemere Informiertheit, der schon anzumerken ist, daß sie im nächsten Augeblick durch andere Informationen weggewischt wird" (71).

Im innerhalb der KI-Forschung mit besonderem Fleiß betriebenen Bestreben, Wahrnehmungen, Ideen und subjektive Erfahrung zu strukturieren und in formale Kategorien zu pressen, werden sie ihrer jeweiligen Eigenart beraubt. Die Wirklichkeit bzw. das Wissen über Wirklichkeit wird durch die Transformation in Computer in ein grobes Raster eingebunden, mit dessen Hilfe Partikulares dem Totalen untergeordnet wird. Die von Adorno als Halbbildung gekennzeichnete Haltung des "taking something for granted" (72) wird so kontinuierlich bestärkt. Und es wird zunehmend weniger darauf ankommen, was einer sagt, welche Bedeutung das Gedachte hat, als vielmehr auf das, was er damit bezweckt. Wissen und Denken verkämen so immer mehr zum Werkzeug in einer allmächtigen Gesellschaftsstruktur, blieben als Anweisung, sinnentleerte Information und Verfahren nur noch ein rudimentärer Rest dessen, was sie einmal für den Menschen waren.

Anmerkungen zu Kapitel 1

1 Rich, 1983, S.1, bezeichnet das Bemuehen der Kuenstlichen Intelligenz um eine exakte Definition als "exercises in futility"
2 Minsky in Boden, M., S. 4, 1977
3 Abacus, Vol 1., No2, 1984
4 Feigenbaum/McCorduck, 1983, S. 12
5 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol. 1, S. 3
6 Winston, 1977, S. 1
7 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 3
8 Winston, 1977, S. 3
9 Simon/Newell, 1972
10 Engelberg/Knoepfler, 1983
11 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 6
12 Graham, 1979, S. 12
13 Barr/Feigenbaum, 1983, Vol.1, S. 6
14 Graham, 1979, S. 20
15 Feigenbaum/McCorduck, 1983
16 Feigenbaum/McCorduck, 1983, S.11
17 Spiegel 6/1983
18 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983
19 Spiegel, 6/1983
20 Simon/Newell, 1972
21 Nilsson, 1982
23 Feigenbaum, 1979
24 Diese werden in einem gesonderten Kapitel noch ausfuehrlich dargestellt.
25 siehe Proceedings der 8. IJCAI in Karlsruhe 1983
26 Wahlster, 1982
27 Barr/Feigenbaum, Vol.I S.226
28 Kintsch et al., 1984
29 Alle Aspekte der Robotics, die ueber die Art der mechanischen Umsetzung hinausgehen, sind in anderen Bereichen der KI repraesentiert.
30 s.a. dBase II und III, Framework, Jazz usw.
31 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983
32 Computer der Fuenften Generation
34 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983, S. 10
35 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983, S. 10
36 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983, S. 18
37 Frueher charakterisierte man oftmals die KI mit dem Satz "Wenn ein Programm funktioniert, ist es nicht KI".
38 Engelberg/Knoepfler, 1983, S. 10
39 Barr/Feigenbaum, 1981, S.3,Vol.1)
40 Turing, 1981, S.4
41 Minsky, 1985
42 Hofstadter 1985, "Goedel, Escher Bach"
43 Hofstadter, ebda, S. 29
44 Weizenbaum, 1980, S.220
45 Engelberg/Knoepfler, 1983, S.11
46 Sloman, 1978
47 Simon/Newell, 1972
48 Winston, 1984, S.2/3
49 Newell/Simon, 1972
50 Winston, 1977, S.11
51 Sloman, 1978, S.27
52 Raulefs, 1982
53 Raulefs, 1982, S. 94
54 Sloman, 1978
55 Sloman, 1978, S. 1
57 Stegmueller, BD. I, S. XXII, 1979
58 Barr/Feigenbaum, 1981
59 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983, S. 62

60 Feigenbaum/McCorduck, 1983, S. 38
61 Im amerikanischen Raum als "paradigm" bezeichnet
62 Feigenbaum, 1977, IJCAI 5
63 Goldstein/Papert 1977
64 Feigenbaum/Mc Corduck, 1983, S. 61
65 Mylopoulos /Levesque, 1983, S.143
66 Graham, 1979, S. 20
67 Graham, 1979, S.22
68 Rich, 1983, S. 27
69 Rich, 1983, S. 27
71 Barr/Feigenbaum, 1981
72 Doyle, 1981
73 Reiter, 1981
74 Lenat, 1984
75 Rich, 1983, S. 29/30
76 Weizenbaum, 1980
77 Weizenbaum, 1980, S.239
78 Weizenbaum, 1980, S.266
79 Sloman, 1978
80 Sloman, 1978
81 Negrotti, 1983

Anmerkungen zu Kapitel 2

2 Nilsson, 1971
3 Mylopoulos/Levesque, IJCAI-Tutorial 1983, S.1
4 Mylopoulos/Levesque, GWAI 1983, S.143
5 Winston, 1977, S.179
7 Wahlster, W., 1977 "Die Repraesentation von vagem Wissen in natuerlich-sprachlichen Systemen der Kuenstlichen Intelligenz" 1977
8 Schefe, 1982, S. 43
9 Schefe 1982
10 Mylopoulos/Levesque, GWAI 1983, S. 143
11 Mylopoulos/Levesque, IJCAI-Tutorial 1983, S.1
12 Barr/Feigenbaum 1981, Vol 1, S. 143
13 Barr/Feigenbaum 1981, VOL 1,S.144
14 ebda, S.144
15 ebda, S. 144
16 ebda, S.144
17 ebda, S.146
18 Barr/Feigenbaum, 1981
19 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S.149
20 s.a. side-effects
21 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 150
22 ebda, S. 178
23 Speck, 1980, S. 677
24 McDermott/Doyle and Hewitt in Barr/Feigenbaum, 1983, Vol. 1, S. 178
25 ebda., S. 178
26 Speck, 1980, S. 678
27 Rich, 1983, S.201/202
28 BABYLON, GMD
30 Lenat, 1984
31 Rich, 1983
32 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S.151
33 Rich, 1983, S.202
34 ebda, S.202
35 ebda, S.240
36 Winston, 1984
37 Rich, 1983, S.241/242
38 ebda, S. 238
40 ebda, S.239
41 ebda, S. 242
42 Piaget, "Psych.d.Intell", 1980

43 Rich, 1983, S.203
44 Kutschera, von/Breitkopf, 1979, S.9
45 ebda, S. 10
46 ebda, S. 11
47 ebda, S. 13
48 Gerster, 1981
49 Kutschera,von/Breitkopf, 1979, S. 18
50 Speck, 1980, S. 42
51 siehe zu allem Gerster 1981
52 Gerster, 1981, S. 34
53 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 162
54 Regelableitungen in Expertensystemen
55 Speck, 1980, S. 495
56 DTV-Atlas zur Mathematik, S. 17
57 Rich, 1983, S. 140
58 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981
59 "functions" Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981, S. 165
60 DTV- Atlas der Mathematik, S. 19
61 Stoyan/Goerz, 1985
63 Mylopoulos/Levesque, GWAI 1983
64 Graham, 1979
65 Mylopoulos/Levesque, IJCAI 1983, S. 2
66 Rich, 1983, S. 137
67 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981, S. 27
68 Filman, in ebda, 1979
70 Barr/Feigenbaum, Vol. 1, 1981, S. 170
71 Winston 1984
72 Mylopoulos/Levesque, GWAI 1983, S.3
73 Raulefs, 1982, S. 77
74 Rich, 1983, S. 215
75 ebda, S.217
76 Raulefs, 1982, S.77
77 Barr/Feigenbaum, Vol1, 1981, S. 180
78 Raulefs, 1982, S. 77
79 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981, S.180
81 Rich, 1983, S.217
82 siehe hier auch Graham, 1979, S.204
83 Wettler, 1980, S.40
84 Mylopoulos/Levesque, IJCAI-Tutorial 1983
85 ebda, S.4
86 Barr Feigenbaum, Vol.1, 1981, S.180
87 ebda, S.181
89 ebda, S.182
90 Nilsson, 1982, S.370)
91 Rich, 1983, S.220/221
92 ebda, S. 221
93 ebda, S.221
94 Graham, 1979, S.203
95 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S.187
96 ebda, S.187
97 Barr Feigenbaum, 1981, Vol.1, S.188
98 Rich, 1983, S.218
99 ebda, S. 219
100 Barr/Feigenbaum, 1981
101 Quillian, in Wettler, 1980
103 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S.216
104 Engelberg/Knoepfler, 1983, S.60
105 Rich, 1983, S. 229
106 ebda, S. 229
107 Raulefs, 1982, S.82
108 Engelberg/Knoepfler, 1983, nach Minsky, S. 64
109 Rich, 1983, S.230
110 Winston, 1977, S.180

111 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.218
112 Ein Frame etwa aus der Pharmakologie, dessen Slot "Körperoberflaeche" nicht direkt besetzt werden kann, kann mit Hilfe einer attached procedure diesen Parameter aus Körpergewicht und Körpergröße errechnen und damit den Slot füllen
113 Winston, 1984, S.379
114 Engelberg/Knoepfler, 1983, S. 81
115 von Nilsson, 1982, S.406 als "when- filled" form" bezeichnet
116 Rich, 1983, S.230
117 bei Nilsson, 1982, S.406 als "to- fill "form" bezeichnet
119 Rich, 1983, S. 230
120 Engelberg/Knoepfler, 1983, S.82
121 ebda, S.66
122 Winston, 1977, S.180
123 Rich, 1983, S. 231
124 Winston, 1977, S.180
125 Winston 1977
127 Rich, 1983, S.222
128 Winston 1977
129 Engelberg/Knoepfler, 1983, S.90
130 ebda
131 Charniak 1977
132 Minsky 1982
133 Schank/ Abelson 1977
134 Rich, 1983, S.234
135 ebda, S.234
136 Schank/Abelson 1977
137 Schank/Abelson 1977
138 Barr/Feigenbaum, 1983, Vol.1, S.212
139 Schank/Abelson, 1977, S. 43/44
140 ebda
141 Barr/Feigenbaum, 1983, Vol.1, S.212
142 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.306
143 Rich, 1983, S.236
144 "The most important of these is the ability to predict events that have not explicitly been observed" Rich, S. 236
145 Rich, 1983, S.236
146 Rich, S.237
147 siehe auch spaeteres Kapitel
148 Rich, 1983, S.237
149 ebda, S.238
150 Wettler 1980, S.181
152 Dies wird in spaeteren Kapitel noch ausfuehrlicher dargelegt.
153 Prozedurales Wissen wird lediglich durch assoziierte Prozeduren, wie beispielsweise bei Frames, implementiert.
154 Mylopoulos/Levensque, IJCAI-Tutorial 1983
155 wie z.B. die Repraesentationssprache PLANNER
156 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.190
157 ebda
158 Winston, 1977, S. 144)
159 Raulefs, 1982, S.78
160 Winston, 1977, S.144
161 ebda, S.144
162 Erman, 1983
163 ebda
164 Raulefs, 1982, S. 78
165 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S. 190
166 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.192
167 Diese werden in weiteren Verlauf dieses Kapitels gesondert dargestellt.
168 Raulefs, 1982, S.78
169 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.197
170 Erman, 1983
171 Barr/Feigenbaum, Vol.1,
172 ebda, S.197

173 Winston, 1977, S.148
174 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.197
175 Raulefs 1982
176 Winston 1977
177 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.198
178 Raulefs, 1982
179 Winston 1977
180 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S. 198
181 Winston, 1984, S. 243
182 Winston, 1977, S.150
184 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.197
185 ebda, S.193
186 ebda, S.193
187 ebda, S.194
188 ebda, S.194
189 ebda, S.194
190 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S.195

Anmerkungen zu Kapitel 3

1 Rich, 1983, S.37
2 Rich, 1983, S.27
3 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1
4 Winston, 1984, S.33
5 Winston 1984
6 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1
7 Nilsson, 1982, S. 63
8 ebda
9 Winston, 1984, S.39
10 Winston, 1984, S. 22
11 Rich 1983, S.30
12 ebda
13 ebda, S. 31
14 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1
15 Rich, 1983, S. 39
16 Rich, 1983, S. 41
17 ebda, S.42
18 ebda, S.44
19 Simon 1975
20 Rich, 1983, S. 46
21 Rich, 1983, S.47
22 ebda
23 Nilsson, 1982, S.72
24 ebda
25 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981
26 Winston, 1977, S.88
27 Winston 1977
28 ebda
29 Winston 1977
30 Raulefs 1982
31 Winston, 1977, S.93
33 Winston, 1984, S.94
34 ebda
35 Winston, 1984, S. 94
36 Rich, S.77
37 Nilsson, 1982, S.72
38 Barr/Feigenbaum, 1983, Vol.1, S. 61
39 Winston, 1984, S. 102
40 Winston
41 Winston, 1984, S. 118
42 Barr/Feigenbaum, 1983, Vol.1, S.64
44 ebda, S.64
45 Nilsson 1968

46 Barr/Feigenbaum, Vol.1, S. 64
47 Nilsson 1982, S.103
48 Nilsson 1982, S. 92
49 Rich, 1983, S.82
50 Winston, 1984, S. 138
51 Winston, 1984, S.140
52 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981
53 Winston, 1984, S. 144
54 Winston, 1984, S. 148
55 ebda
56 Winston, 1984, S. 145/146
57 Winston, S. 144
58 ebda
59 ebda
60 Davis/Lenat 1982
61 Rich, 1983, S. 85
62 Davis/Lenat 1982
63 Davis/Lenat, 1982
64 ebda
65 ebda
66 Davis/Lenat 1982
67 Rich, 1983
68 Nilsson, 1982, S. 21
69 Nilsson, 1982
70 ebda
71 Diese Moeglichkeit ist beispielsweise in der Programmiersprache PROLOG durch "marker" beruecksichtigt worden
72 Barr/Feigenbaum, Vol.1, 1981
73 Nilsson, 1982, S. 60
74 Winston 1984, S.82
76 ebda
77 Winston 1984, S.83
78 Nilsson 1982
79 Siehe hierzu auch Nilsson, 1982 S.25ff
80 Nilsson, 1982, S. 34
81 ebda
82 Nilsson 1982, S. 35
83 Nilsson 1982
84 Nilsson, 1982, S. 48
85 Winston, 1984, S. 160
86 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 146
87 ebda
88 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 146/147
89 Nilsson, 1982, S.5
90 Bibel, 1984
91 Winston, 1984, S.209
92 Graham, 1979, S. 180
93 Robinson, in Rich 1983
94 Rich, 1983, S. 148
95 Rich, 1983, S. 149
96 Clocksin/Melish 1981
97 Graham, 1979, S. 187
98 Bibel, 1982, S. 104
99 Barr/Feigenbaum, 1981, Vol.1, S. 86
100 Winston, 1984, S.20
101 siehe Winston, ebda
102 Winston, 1984, S. 229
103 Barr/Feigenbaum, 1982, Vol.3, S. 91
104 Winston, 1984, S. 229
105 Winston, 1984, S. 230
106 Barr/Feigenbaum, 1982, Vol.3, S. 78
107 ebda
108 McDermott 1982

109 Rich, 1983, S. 167
110 ebda
111 Barr/Feigenbaum, 1982, Vol.3, S.94
112 Barr/Feigenbaum, 1982, Vol.3, S.114
113 Barr/Feigenbaum, Vol.3, S.83ff
114 Reiter 1981
115 Barr/Feigenbaum, Vol.3, S.115
116 McCarthy 1981
117 Barr/Feigenbaum, Vol.3, S.116
118 Reiter, McDermott und Doyle
119 Barr/Feigenbaum, 1982, Vol.3, S. 116
120 Rich, 1983, S. 176
121 Rich, 1983, S. 180
122 Doyle, 1981, S. 496ff
123 Rich, 1983, S. 180
124 Doyle 1981
125 Doyle, 1981, S. 498
126 Winston, 1984, S. 250
127 Doyle 1981
128 Doyle, 1981, S. 496

Anmerkungen zu Kapitel 4

1 Hayes-Roth,/Waterman/Lenat, 1983, S. xi
2 Feigenbaum, 1979
3 Hayes-Roth/Waterman/Lenat, 1983, S. 28
4 Feigenbaum, 1979
5 Erman, 1983
6 Raulefs, 1982, S. 65
7 Buchanan/Shortliffe, 1984, S.5
8 Hayes-Roth/Waterman/Lenat, 1983, S. 13
9 ebda, S.4
10 ebda, S.4
11 ebda, S.12
12 Feigenbaum/McCorduck, 1983, S.77
13 Feigenbaum, 1979, S.7
14 Erman, 1983
15 Brachman/Amarel et al., 1983, S. 42ff
16 Hayes-Roth et al., 1983, S.4ff
17 ebda, S.5
19 Brachmann et al., 1983, S.43
20 Brachman/Amarel, 1983, S.44
21 ebda, S.44
22 Feigenbaum, 1979
24 Feigenbaum/Buchanan/Lederberg, 1971, S.187
25 Feigenbaum, IJCAI 1977
26 Erman 1983
27 Newell, in Buchanan/Shortliffe (Foreword), 1984
28 Erman, 1983, S. 29
29 ebda
30 Hayes-Roth/Waterman/Lenat, 1983, S. 17
31 ebda, S. 16
32 Davis/Lenat 1982
33 Hayes-Roth et al., 1983, S. 16/17
34 Davis/King, 1984, S. 23
35 Erman 1983
36 Winston, 1894
37 Davis/King, 1984, S. 20
38 Cendrowska/Bramer, 1984
39 Hayes-Roth, et al., 1983, S. 17
40 Brachman/Amarel, 1984, S. 42
41 Raulefs, 1982, S.68
42 Hayes-Roth et al., 1983

43 Hayes-Roth, et al., S.15
44 Erman, 1983
45 ebda
46 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 155ff, Brachman/Amarel, S.54ff, Erman IJCAI 1983
47 Savory 1985
48 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, 1984
49 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, S.50
50 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum
51 ebda
52 ebda, S.57
53 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, 1984, S.59
54 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, 1984, S.63
55 Gorry, 1984
56 Gorry, S.18
57 Pauker et al., 1984
58 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, S.36
59 Gorry, 1984, S.20
60 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum 1984
61 Clancey/Shortliffe, 1984, S.3
62 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum 1984
63 Clancey/Shortliffe 1984
65 Clancey/Shortliffe
66 Clancey/Shortliffe, S.13
67 ebda
68 Clancey/Shortliffe, S.13
69 ebda, S.13
70 Clancey/Shortliffe, S.14
71 Gorry 1984
72 Gorry, S. 24
73 Pauker/Gorry/Kassirer/Schwartz 1984
74 Pauker/Gorry/Kassirer/Schwartz 1984
75 Pauker/Gorry/Kassirer/Schwartz 1984
76 ebda., S.158
77 Buchanan/Shortliffe, 1984
78 Buchanan/Shortliffe 1984
79 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.192
80 Cendrowska/Bramer 1984
81 Barr/Feigenbaum, Vol.2, 1982
82 Cendrowska/Bramer, 1984, S. 465
83 Cendrowska/Bramer
84 Shortliffe/Buchanan 1984
85 Cendrowska/Bramer 1984
86 Cendrowska/Bramer
87 ebda
88 Shortliffe/Buchanan 1984
89 Cendrowska/Bramer
90 Cendrowska/Bramer
91 siehe auch entsprechendes Kapitel dieser Arbeit
92 Raulefs 1982
93 Rich, 1983, S. 195
94 Cendrowska/Bramer 1984
95 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.189
96 Shortliffe/Buchanan 1984
97 Shortliffe/Buchanan
98 Raulefs, 1982, S. 85
99 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.192
100 Raulefs, 1982, S. 90
101 Papert 1982
102 Papert 1982
103 Fischer, "Prokop" Heft 1, S.10
104 Yazdani, "New Horizons...", 1984
105 Wildenberg, 1981, Harbordt, 1974
106 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 255

108 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.225
109 Clancey 1984 , "Use of..."
110 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.225
111 Carbonell, 1970
112 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.226
113 Clancey, "Intelligent Computer-Aided Instruction..., 1984, S.258
114 ebda, S.258
115 Carbonell 1970
116 Koffman/Blount, 1975
117 Laubsch, 1975
118 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.228
119 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.299
120 Goldstein, 1977, in: Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.230
121 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 231
122 ebda S.231
123 Goldstein/Carr 1977 MIT
124 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 231
125 ebda, S. 231
126 ebda, S. 233
127 ebda, S.233
128 Collins 1976
129 Brown/Burton 1978
130 Goldstein 1977 in Barr/Feigenbaum, , Vol.2
132 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 234
133 Wescourt/Hemhill 1978 in Barr/Feigenbaum, Vol.2
134 Brown/Collins/Harris, 1978
135 Stevens/Collins/Goldin 1982
136 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.234
137 Barr/Feigenbaum, S.234
138 Goldstein 1977 in: Barr/Feigenbaum, Vol.2
139 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 235
140 Clancey, "Intelligent CAI...", 1984, S. 259
141 ebda
142 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 267
143 Clancey, "Use of...", 1984, S. 466
144 ebda
145 ebda, S.476
146 Clancey, "Intelligent CAI...", 1984, S. 265
147 ebda
148 Bobrow/Winograd 1977
149 ebda
150 Clancey, "Use of...", 1984
151 ebda, S.478
152 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.270
153 Clancey, "Intelligent CAI...", 1984
154 Clancey, "Use of...", 1984, S. 478
155 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S.271
156 Clancey, "Use of...", 1984, S. 479
157 ebda
158 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 268
159 Clancey, "Use of...", 1984
160 ebda, S. 467
161 ebda
162 Clancey, "Intelligent CAI...", 1984, S. 262
163 ebda, S. 262
164 ebda, S. 264
165 Barr/Feigenbaum, Vol.2, S. 274
166 Hoffer, E. et al., 1975
167 Clancey, "Intelligent CAI...", 1984, S. 270
168 ebda, S. 269
169 van Melle, 1979

Anmerkungen zu Kapitel 5

2 Abgesehen von Personen wie Weizenbaum oder externen Kritikern wie Dreyfuss
3 Retti, 1984, S.95
4 Brachman/Amarel et al.,1983, S.55
5 Brachman/Amarel et al,1983, S.55
6 Gaschnig/Klar/Pople, 1983, S. 250
7 Gaschnig/Klar/Pople, 1983, S. 250
8 Brachman/Amarel et al., 1983, S.56
9 Kulikowski, 1984, S. 96
10 siehe das System EURISCO, Lenat 1984
11 Hayes-Roth/Waterman/Lenat, 1983, S.28
12 EURISKO, Lenat, 1984
14 Lenat/Davis/Doyle, 1983
15 Erman 1983
16 Erman, 1983, S.22
17 Davis/King, 1984
18 Davis/King, S.30
19 Raulefs, 1982, S.94
20 Davis/Lenat 1982
21 Raulefs, 1982
22 Suwa/Scott et al., 1984, S.162
23 ebda
24 Kulikowski, 1984, S.96
25 Brachman/Amarel et al., 1983
26 ebda
27 Retti, 1984
28 ebda
29 Brachman/Amarel et al., 1983, S.55
30 Erman 1983
31 Shortliffe/Buchanan/Feigenbaum, 1984, S.67
32 Brachman/Amarel et al., 1983
33 Erman 1983
34 Gaschnig/Klar/Pople, 1983
35 Brachman/Amarel et al., 1983
36 Rich, 1983, S. 288
37 Erman 1983
38 ebda, S. 8
39 Buchanan/Shortliffe, "A Modell of inexact reasoning...", 1984, S. 239ff
40 ebda, S. 244
41 ebda, S. 270
42 Szolovits/Pauker, 1984, S. 235
43 Cendrowska/Bramer, 1984, S. 489
44 Buchanan/Shortliffe, "A Modell of....", 1984, S. 271
45 Brachman/Amarel et al.,1983, S.50
46 Winston 1984
47 Michalski/Carbonell/Mitchell, 1984
48 Brachman/Amarel et al., 1983, S.50
49 Brachman/Amarel et al., S. 41
50 Retti, 1984, S.95
51 Erman, 1983, S.22
52 Brachman/Amarel et al., 1983, S.56
53 Brachman/Amarel et al., S.56
54 Erman, 1983, S.22
55 Brachman/Amarel, et al., S.55
56 Wallis, et al., 1984, S. 387
57 Gaschnig/Klar/Pople, 1983
58 Brachman/Amarel et al., 1983, S.55
59 Brachman/Amarel et al., S. 48
60 Sowa, 1983, S. 285
61 Brachman/Amarel et al., S. 50
62 Feigenbaum, 1979, S.7/8
63 Rich, 1983, S. 215

64 Rich, S. 215
65 Szolovits/Pauker, 1984, S. 236ff
66 Feltovich et al., 1984
67 Feltovich et al., S.318
68 Vandamme/Vervenne et al., 1985
69 Brachman/Amarel et al., 1983
70 Retti 1984
71 Brachman/Amarel et al., 1983
72 Brachman/Amarel et al., S.56
74 Sloman 1979
75 Hayes 1979
76 Carbonell 1979
77 Sloman 1979
78 Sloman, 1979, S. 239

Anmerkungen zu Kapitel 6

1 Bunge, 1984
2 Bunge, S. 26
3 Bunge, 1984
4 Steinbuch, 1971, S. 206
5 Changeux 1984
6 Changeux, S.87
7 Changeux, S. 160
8 Changeux, S. 104
9 Bunge, S. 46
10 Changeux, S. 133
11 Steinbuch 1971
12 Stevens 1985
13 Als Hinweis kann auch hier wiederum die Pathophysiologie herangefuehrt werden, beispielsweise die Dopaminstoerungen bei Parkinsonismus.
14 Iversen 1985
15 Changeux, S. 118
16 Patterson et al., 1985, sprechen in diesem Zusammenhang von Neuronen und "ihren" Transmittern
17 So sind beipielsweise bei psychiatrischen Auffaelligkeiten keine Einzelneurone erkrankt, sondern es handelt sich um Stoerungen komplexer neuraler Systeme
18 Bunge, S. 55
19 Bunge gibt als denkbare Zahl 100 Billionen an, eine unvorstellbar grosse Zahl
20 Reichardt 1984
21 Bunge, 1984: konstante und variable Typen, afferente und efferente Fasern etc..
22 Changeux, S. 87
23 Changeux, S. 166
24 Bunge 1984
26 Changeux 1984
27 Bunge, S. 96
28 Bunge, S. 100
29 Neisser 1963
30 Bunge 1984
31 Changeux, S. 208
32 Weizenbaum 1980
33 Hume, in Stoerig 1962
34 Changeux 1984
35 Changeux 1984
36 Changeux, S. 179
37 Changeux 1984
38 ebda
39 Rosch/Mervis, 1975
40 Fodor 1975
41 Changeux, S. 179
42 Rich 1983
43 Guttmann, 1982, S. 385
44 Guttmann, S. 387

45 Lorente de No 1933 in Guttmann
46 Guttmann, S. 386
47 Caspers, 1970
48 Caspers, S. 481
49 Hyden 1970
50 Eccles 1975
51 Guttmann, S. 394
52 beispielsweise der Stoff S 100
53 Guttmann 1982
54 Hebb 1949
55 Schade 1959
56 Scheibel 1961
57 Cajal in Bunge
58 Hebb 1949
59 Eccles 1975
60 Changeux, S. 118
61 Bunge, S. 173
62 Bindra 1976
63 Eccles, 1975, S.227
64 Eccles, 1975, S. 227
65 Guttmann, S. 411
66 Eccles, 1975, S. 229
67 Kent 1981
68 Bunge 1984
69 ebda
70 Bunge, S, 197
71 Bunge, S. 200
72 Bunge, S. 202
73 Neisser 1963
74 Bunge 1984
75 Bunge, S. 210
76 Changeux 1984
77 Changeux, S. 194
78 Changeux, S. 201
79 Bunge, S.220
80 Pfaff 1985
81 Bunge, S. 225
82 Kent 1981
83 Kent, S. 268
84 Kent, S. 269
85 Bunge 1984
86 Bunge, S. 25
87 Reichardt 1984
88 Changeux 1984
90 Putnam 1982
91 Eccles 1975
92 Eccles in: Popper/Eccles 1982
93 Kent, S. 26°Z

Anmerkungen zu Kapitel 7

1 Freud, Ges.Werke, Bd.1, 1982
2 Haber 1969
3 Bourne et al., 1971
4 Ryle 1963
5 ebda, S. 463
6 Wertheimer
7 Oerter, S. 16
8 Hume in Stoerig
9 Kintsch, S. 252
10 Wygotsky 1974
11 Wertheimer 1957
12 Duncker 1963

13 Koehler 1940
14 siehe hierzu auch das beruehmte Figur-Hintergrund-Beispiel
16 Hofstaetter, 1970, S.144
17 Bourne, et al., 1971, S. 36
18 Wessels, 1984, S. 36
19 Newell/Simon, 1972, S. 870
20 Wessels, S. 40
21 Wessels, S.21
22 Wessels, S. 45
23 Wessels
24 Wessels, S. 216
25 Wittgenstein, 1971
26 Rosch/Mervis 1975
27 Figge/Job, 1985
28 Wessels, S. 223
29 Wittgenstein 1971
30 z.B. bei der Kategorie Bett an ihr eigenes Bett denken
31 Wessels 1984
32 ebda
33 Rosch 1975
35 Wessels, S. 241
36 Whorf, 1956, S. 66
37 Whorf, 1956
39 Whorf ebda
40 Rosch 1978
41 siehe hierzu auch Unterschungen von Berlin und Kay
42 Wessels, S. 244
43 Wessels, S. 246
44 Wessels
45 Tulving 1972
46 Wessels, S. 251
48 Figge/Job, 1985, S. 2
49 Liben 1977
50 Kintsch 1972
51 Hoffmann 1983
52 Hoffmann, S. 235
53 Lindsay, S.380 1973
55 Figge und Job weisen hier auf die Problematik des Begriffs "semantisches Gedaechtnis" hin.
57 Collins und Quillian 1972
58 Wessels, S. 255/256
59 Wessels, S. 257
60 Piaget, 1981
61 Wessels, S. 262
62 Wessels, S. 263
63 Wessels, S. 264
64 siehe Kapitel ueber Kategoriebildung
65 Wettler, S. 266
66 Katz
67 Bar-Hillel, 1970
68 Wessels, S. 268
69 Michalski/Carbonell/Mitchell 1984
70 Figge/Job, S. 5
71 Norman/Rumelhart 1975
72 ebda, S. 9
73 Norman/Rumelhart, S. 12
74 Norman/Rumelhart
75 ebda, S. 17
76 Figge/Job 1985 , S.3
77 Norman/Rumelhart
78 Wessels, S. 268
79 Anderson/Bower 1972, Human Associative Memory
80 Wessels, S. 276
81 Norman/Rumelhart 1975

82 Wessels, S. 284
83 Figge/Job 1985
84 Wessels, S. 291
85 Linton, 1975
86 Linton, S. 376-377
87 Linton 1975
88 Norman/Rumelhart 1975
89 ebda, S. 21
90 Norman/Rumelhart, S. 23
91 Norman/Rumelhart, S. 29
92 Wessels, S. 311
93 Wessels, S. 312
94 Hoermann 1976, S. 502
95 Lewandoski, 1980, S. 1049
96 Searle 1982
97 Dreyfuss, 1985, S.59
98 Wittgenstein, 1971
100 Minsky 1982
101 Schank/Abelson 1977
102 Norman/Bobrow 1979
103 Norman/Rumelhart 1975
104 Norman/Rumelhart, S. 67
105 Hofstaetter, 1970, S. 316 /aehnlich: Lewandoski 1980
106 Dreyfuss, S. 216
107 Bobrow, in Dreyfuss, S. 83
108 Newell/Simon 1972
109 Wessels, S.339
110 Wessels, S. 340
111 Wessels, S, 343
112 Wertheimer 1957
113 Wertheimer, in Graumann, S. 233
115 Suellwold, S. 273
116 Durkin 1937
117 Maier 1933
118 Meili 1961
119 Collins/Quillian 1972
120 Wessels, S. 346
121 Wessels, S. 356
122 Eisenstadt/Kareer 1975
123 Eisenstadt/Kareer, S. 314
125 Newell und Simon 1972
126 Eisenstadt/Kareer
127 Eisenstadt/Kareer, S. 330
128 Newell/Simon 1972
129 Wessels, S. 359
130 siehe beispielsweise das Missionars- Kannibalen-Problem
131 Wessels, S. 360
132 Wessels, S. 363
133 Wessels, S. 367
134 Wessels, S. 369
135 Dreyfuss 1985
136 Eisenstadt/Kareer, S. 346
137 Eisenstadt/Kareer 1975
138 Wessels, S. 370
139 ebda
140 Wertheimer
141 Krech/Crutchfield 1972
142 Krech/Crutchfield, S. 283
143 James 1890, in Krech/Crutchfield
144 Hofstadter, "Goedel...", 1985
146 Oerter, 1974, S. 287
147 Oerter, S. 288
148 Neisser 1963

149 Koestler 1966
150 Yazdani, "Creativity...", 1984, S. 181

Anmerkungen zu Kapitel 8

1 Elstein et al., 1979, S.VII
3 Newell/Simon 1972
4 Elstein, .S, 277ff
5 ebda
6 ebda
7 Elstein, et al., S.244- 245
8 Kleinmuntz 1966
9 Hayes 1968
10 Newell/Simon 1972
11 ebda
13 Elstein et al.
14 ebda
15 Elstein et al., S. 21
16 Scholz 1983
17 Elstein et al., S.15
18 Claparede 1934
19 Neisser 1963
20 Neisser 1963
21 Gagne/Smith 1962
22 McGuire 1970
23 Feltovich et al., 1984, S. 277
24 Feltovich, et al., S. 277
25 Rumelhart 1979
26 Piaget 1980
27 Elstein et al., S. XI
29 Chi/Feltovich/Glaser, 1981
30 Elstein
31 Feltovich et al., S. 279
32 Gomez/Chandrasevakan, 1984
33 Trennung zwischen la langue und la parole bzw. Sprachkompetenz und - performanz
34 Dahmer, 1977, S.3
35 Dahmer, S.3
36 Feltovich et al., 1984
37 Feltovich, S.313
38 Elstein et al., 1979
39 Wessels 1984
40 Gomez/Chendrasekawan 1984
41 Siegenthaler/Hegglin, 1975, S.1
42 Pschyrembel 1982
43 Webster's New Collegiate Dictionary
44 Siegenthaler/Hegglin, S.3
45 ebda
46 ebda, S.1
47 ebda, S.1
48 Elstein et al., S.115
49 Weed 1971
50 Morgan/Engel in Elstein et al., 1979
51 Elstein et al., 1979
53 Dahmer, S. 2
54 ebda
55 ebda
56 ebda
57 ebda, S. 4
58 ebda
59 Popper 1969
60 Dahmer 1977
61 In der Studie von Elstein erwies sich gerade dies als Hauptursache fuer falsche Diagnosen, d.h. der hypothesenbedingt verengte Blickwinkel fuehrte zu falschen Schluessen.

62 Elstein et al.,
63 Elstein, S. 271
64 Dahmer, S. 2-3
65 Hamm, 1975, S. 72
66 Siegenthaler/Hegglin 1975
67 ebda
68 ebda, S. 19
69 ebda, S. 23
70 Dahmer 1977
71 Viefhues 1981
72 Gruber WDR II Koeln, "Kuenstliche Intelligenz. Hoffnung oder Alptraum?"
74 Elstein et al., S. 278
75 Elstein et al.
76 Elstein et al.
77 Elstein, S. 162
78 Elstein, S. 162
79 Elstein/Allal
80 Elstein et al., S. 279
81 ebda, S.113
82 ebda, S. 280
83 ebda, S. 280
84 ebda
85 ebda, S. 198
86 ebda: "Generation of Intitial Problem Formulations Performance of Experimenced Physicians"
87 Elstein et al., S. 187
88 Hamm 1975
89 Roessler/Viefhues, 1978, S. 37
90 Viefhues, 1982
91 Viefhues
94 WHO-Ordnung
95 Deppe
96 Roessler/Viefhues
98 Roessler/Viefhues, S. 17
99 ebda, S.20/21
100 Elstein et al.
101 Siegenthaler/Hegglin
102 ebda, S.2
104 Heisig, 1981, S. 37ff
105 Marx 1976
106 Vossschulte et al.,
107 Bernoth
108 Jores
109 Braeutigam
110 Groddeck
111 Delius
112 Brede
113 Roessler/Viefhues, S. 24
115 Viefhues, 1982, S.97
116 Viefhues, S.98
117 Viefhues, S.98
118 Roessler/Viefhues, S.34
119 Viefhues, S.10°Z

Anmerkungen zu Kapitel 9

1 Searle 1981
2 Dreyfuss 1985
3 Weizenbaum 1980
4 Hofstadter, "Goedel...", 1985
5 Hofstadter, ebda, S.596
6 Negrotti 1983
7 Negrotti, S. 20
8 Hofstadter, "Goedel...", 1985, S. 605

9 Hofstadter,ebda, S. 617
10 Negrotti 1983
11 Schischkoff 1982
12 Dreyfuss, 1985, S. 18
13 Dreyfuss, S. 21
14 Lamettrie, zit. in Popper 1982
15 Speck, 1980
16 siehe entsprechende Untersuchung von Negrotti 1983
17 Merleau-Ponty
18 Wittgenstein 1971
19 Minsky, hier zit. nach Dreyfuss, S.271
20 Barr/Feigenbaum, 1981/82
21 Hofstaetter
23 Dreyfuss, S. 275
24 siehe hier auch den von Heidegger gepraegten Begriff der Subwelt, dem die gesamte Alltagswelt immanent ist
25 Habermas,"Erkenntnis...", 1981, S. 114
26 Speck, S. 349
27 Minsky 1975
29 Husserl
30 Als Beispiel kann etwa die Betrachtung eines Stuhls mit seinen unterschiedlichen Spezifikationen und individuell differente Bedeutungszuweisungen.
31 Berger/Luckmann 1980
32 Heidegger
33 Berger/Luckmann
34 z.B. durch die Programmiersprache PROLOG
35 Marcuse, "Der eindimensionale...", 1971, S. 152
36 Berger/Luckmann
37 Stegmueller, Bd, II, S. 432
38 Stegmueller, Bd. II, S. 414
39 Horkheimer/Adorno 1973
40 Speck, S. 493
41 Habermas, "Erkenntnis...", S. 95/96
42 Habermas,"Erkenntnis...", S. 181
43 Horkheimer 1973, "Verantwortung...", S. 72
44 Minsky in Dreyfuss, S. 90
45 Wahrig's Deutsches Woerterbuch
46 "machines that can reason and perceive"
47 Habermas, "Erkenn...", S. 143
48 Peirce "Lectures in Pragmatism, V, S. 161
49 Marcuse, "Der eindimensionale..." S. 150
50 ebda, S. 151
51 Freud, Gesamm. Werke, Bd. 1, 1982
52 Hofstaetter,. Stichwort Denken
53 Piaget "Einfuehrung...", 1980
54 Bryan Johnson 1966
55 Adorno, "Negative Dialektik"
56 Dreyfuss, S. 137
57 Dreyfuss
58 Searle 1981
59 Sichtbar im theoretischen Konzept Chomskys und seiner hier vorgenommenen Unterscheidung von Sprachkompetenz und -performanz
60 Dreyfuss, S. 140
61 Dreyfuss, S. 149
62 Wittgenstein, 1971
63 Adorno 1972, "Soziologische Schriften"
64 Dreyfuss, S. 170
65 Weizenbaum 1980
66 Weizenbaum, S. 327
67 Horkheimer, "Zum Begriff der Vernunft", 1973, S. 199
68 Horkheimer, ebda, S.199
69 Marcuse, "Der eindimensionale...", S. 104
70 Adorno, "Theorie der Halbbildung", 1972

71 Adorno, ebda, S. 115
72 Adorno, ebda, S. 118

Ach, N., "Begriffsbildung und Suchmethode", in: Graumann, C.F., a.a.O.

Adorno, Th. W. et al., "Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie", Darmstadt, Neuwied 1974, 3.Auflage

Adorno, Th.W., "Gesellschaftstheorie und empirische Forschung", in: ders., "Soziologische Schriften 1", Frankfurt am Main 1972

Adorno, Th.W., "Gesellschaft", in: ders., "Soziologische Schriften 1", Frankfurt am Main 1972

Adorno, Th.W., "Negative Dialektik", Franfurt am Main 1970

Adorno, Th.W., "Theorie der Halbbildung", in: ders., "Soziologische Schriften 1", Frankfurt am Main 1972

Adorno, Th.W., "Minima Moralia", Frankfurt am Main, 1971

Adorno, Th.W., "Stichworte. Kritische Modelle 2", Frankfurt am Main 1970, 3. Auflage

Adorno, Th.W., "Studien zum autoritaeren Charakter", Frankfurt am Main 1973

Adorno, Th.W., "Zum Verhaeltnis von Soziologie und Psychologie", in: ders., "Soziologische Schriften 1", Frankfurt am Main 1972

Adorno, Th.W., "Zur Metakritik der Erkenntnistheorie", Frankfurt am Main 1981, 2. Auflage

Adorno, Th.W., Zur Logik der Sozialwissenschaften", in: ders., "Soziologische Schriften 1", Frankfurt am Main 1972

Aikins, J.S., "A Representation Scheme Using Both Frames and Rules", in: Buchanan, B.G., Shortliffe,

Amarel, S., "Expert behaviour and problem representations", in: Elithorn, A., Banerij, R.(eds.), "Artificial & Human Intelligence" Amsterdam 1984

Anderson, J.R., Bower, G.H., "Human associative memory", Washington 1973

Apel, K.O. (Hrsg), "Sprachpragmatik und Philosophie", Frankfurt am Main 1982

Armstrong, D.M., Malcolm, N., "Consciousness & Causality", Oxford 1984

Balkhausen, D., "Elektronik-Angst ... und die Chancen der Dritten Industriellen Revolution", Duesseldorf, Wien 1983

Bar-Hillel, Y., "Aspects of language", Jerusalem 1970

Barr, A., Feigenbaum, E.A., "The Handbook of Artificial Intelligence", Vol. 1, 2 und 3, London 1981/1982

Ben-David, J., Collins, R., "Soziale Faktoren im Ursprung einer neuen Wissenschaft: der Fall der Psychologie", in: Weingart, P.(Hrsg), "Wissenschaftssoziologie II. Determinanten wissenschaftlicher Entwicklung", Frankfurt am Main 1974

Bell, D., "Die nachindustrielle Gesellschaft", Campus 1975

Benacerraf, P., Putnam, H.(eds), "Philosophy of Mathematics", Cambridge, Mass. 1985, 2. Auflage

Berger, P.L., Luckmann, T., "Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit", Frankfurt am Main 1980

Bernoth, E., Link, M., Weise, W., "Gynaekologie. Differentialdiagnose und Klinik"., Leipzig 1984

Bibel, W., Siekmann, J.H., (Hrsg), "Kuenstliche Intelligenz", Informatik-Fachbereichte Nr. 59, Berlin, Heidelberg, New York 1982

Bieber, H., "Die Diktatur der Daten", in: Hansen, H.R., Schroeder, K.T., Weihe, H.J.(Hrsg), "Mensch und Computer. Zur Kontroverse ueber die oekonomischen und gesellschaftliche Auswirkungen der EDV", Muenchen, wien 1979

Bloch, E. "Prinzip Hoffnung", Bd. II, Frankfurt am Main 1973

Boden, M.A., "Methodological links between AI and other disciplins", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Boden, M.A., "AI and human freedom", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Boden, M.A., "Artificial Intelligence and Natural Man", Hussocks Sussex 1977

Boden, M.A., "Minds and Mechanisms. Philosophical Psychology and Computational Models", Brighton, Sussex 1981

Bohnert, L., "Forecasts and Outcomes in Information Science", in: "1984: Challenges To an Information Society", Proceedings of the 47th ASIS Annual Meeting 1984, Vol.21

Bolkart, W., "Rechner der fuenften Gegeneration", in: Computer Magazin 4/1984

Bolter, J.D., "Turing's Man. Western Culture In The Computer Age", Old Woking, Surrey, 1984

Bonss, W., Honneth, A., "Sozialforschung als Kritik", Frankfurt am Main 1982

Bourne, L.E., Ekstrand, B.R., Dominowski, R.L., "The Psychology of Thinking", Englewood Cliffs N.J., 1971

Brachman, R.J., Amarel, S., et al. "What are Expert systems", in: Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B., "Building Expert Systems", Reading, Mass. 1983

Brachman, R.J., Smith, B.C. (eds), "SIGART newsletter 70", Special Issue on knowledge representation", 1980

Brady, J.M., "The social implications of AI", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Brutigam, W., Christian, P., "Psychosomatische Medizin", Stuttgart 1973

Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Bramer, M.A., "Expert Systems: The Vision and The Reality", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Brede, K., (Hrsg), "Einfuehrung in die Psychosomatische Medizin", Frankfurt am Main 1974

Brodie, M.L., et al. (Eds), "On Conceptual Modelling: Perspectives from Artificial Intelligence Databases and Programming Languages", New York 1983

Bronzino, J.D., "Computer Applications for Patient Care", Reading, Mass. 1982

Brown, J.S., Burton, R.R., "Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematics skills", in: Cognitive Science 2, 1978

Brown, J.S., Collins, A., Harris, G., "Artificial intelligence and learning strategies", New York 1978

Brown, J.S., Burton, R.R., de Kleer, J., "Pedagogical, natural language and knowledge engineering techniques in Sophie I, II and III", in: Sleeman, D., Brown, J.S.(eds.), "Intelligent Tutoring Systems", London 1982

Bryan Johnson, A., "Aus dem Traktat ueber die Sprache", in: Kursbuch 5, Frankfurt am Main 1966

Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H., "Rule-Based Expert Systems", Reading Mass. 1984

Buehl, W.L., "Einfuehrung in die Wissenschaftssoziologie", Muenchen 1974

Bundy, A.(ed), "Catalogue of Artificial Intelligence Tools", Berlin, Heidelberg, New York 1984
Bundy, A., "Meta-level inference and consciousness", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Bundy, A., Silver, B., Plummer, D., "An Analytical Comparison of Some Rule-Learning Programs", in: Artificial Intelligence, Vol 27, No. 2, 1985

Bunge, M., "Das Leib-Seele Problem", Tbingen 1984

Burton, R.R., Brown, J.S., "An investigation of computer coaching for informal learning activities", in: Sleeman, D., Brown, J.S.(eds.), "Intelligent Tutoring Systems", London 1982

Carbonell, J.R., "AI in CAI: An artificial intelligence approach in computer-aided instruction", in: IEEE Transactions on Man-Machine Systems, MMS-11, 4, 1970

Caspers, H: "Zentralnervensystem", in: Keidel, W.D. (Hrsg.), "Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie", Stuttgart 1970, 2. Auflage

Cendrowska, J., Bramer, M., "Inside an Expert System: A Rational Reconstruction of the MYCIN Consultation System", in: O'Shea, T., Eisenstadt, M., "Artificial Intelligence. Tools, Techniques and Applications", New York 1984

Changeux, J., "Der neuronale Mensch", Reinbek 1984

Charniak, E., McDermott, D., "Introduction to Artificial Intelligence", Reading, Mass. 1985

Charniak, E., "Cognitive Science is Methodologically Fine", in: KIntsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Charniak, E., "Referenz und Fragebeantwortung in einfachen Erzaehlungen", in: Eisenberg, P., a.a.O., 1977

Chi, M.Th., Feltovich, P.J., Glaser, R., "Categorization and representation of physics problems by experts and novices", in: Cognitive Science 5, 1981

Chomsky, N., "Regeln und Repraesentation", Frankfurt am Main 1981

Chouraqui, E., "Computational models of reasoning", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Clancey, W.J., "Methodology for Building an Intelligent Tutoring System", in: KIntsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., "Readings in Medical Artificial Intelligence", Reading, Mass., 1984

Clancey, W.J., "Intelligent Computer-Aided Instruction", in: Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H., a.a.O., 1984

Clancey, W.J., "Use of MYCIN's Rules for Tutoring", in: Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H., a.a.O., 1984

Claparede, E., "Die Entdeckung der Hypothese", in: Graumann, C.F., a.a.O.

Clocksin, W.F., Mellish, C.S., "Programming in Prolog", Berlin, Heidelberg, New York 1981

Cohen, P.R., Grinberg, M.R., "A Framework for Heuristic Reasoning About Uncertainty", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Cole, M., Scirbner, S., "Cross-Cultural Studies of Memory and Cognition", in: Kail, R.V., Hagen, J.W., "Perspectives on the Development of Memory and Cognition", Hillsdale 1977

Collins, A., "Processes in acquiring knowledge", in: Anderson, R.C., Spiro, R.J., Montague, W.E. (eds.), "Schooling and the acquisition of knowledge", Hillsdale 1976

Collins, A.M., Quillian, M.R., "How to Make a Language User", in: Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Cookson, M.J., Holman, J.G., Thompson, D.G., "Knoweldge Acquaisition for Medical Expert Systems: a System for Eliciting Diagnostic Decision Making Histories", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Coy, W., "METH - EMETH. Abenteuer der kuenstlichen Intelligenz", in: Kursbuch 75, "Computerkultur", 1984

Curnow, R., Curran, S., "Anwendung der Technologie", in: Friedrich, G., Schaff, A.(Hrsg), "Auf Gedeih und Verderb. Mikroelektronik und Gesellschaft", Wien 1982

Curtius, F., "Individium und Krankheit. Grundzuege einer Individualpathologie", Berlin 1959

Dahmer, H., "Eine neue Wissenssoziologie", in: ders., "Politische Orientierungen", Frankfurt am Main 1973

Dahmer, J., "Anamnese und Befund", Stuttgart 1977, 3. Auflage

Davidson, D., "The Material Mind", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Davies, N.G., Dickens, S.L., Ford, L., "TUTOR - A Prototype ICAI System", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Davis, D.B., "Learning with Technological Tutors", in: High Technology, Vol. 4, No. 10, 1984

Davis, R., Buchanan, B.G., Shortliffe, E.H., "Production Rules as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., a.a.O.

Davis, R., Lenat, D.B., "Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence", Mc Graw Hill 1982

DeLand, E.C.(ed), "Information Technology in Health Science Education" , New York London 1978

Delius, L., "Psychovegetative Syndrome", Stuttgart 1966

Denett, D.C. "Intentional Systems", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Dennett, D.C., "Brainstorms. Philosophical Essays on Mind and Psychology", Brighton, Sussex, 1981, 2. Auflage

Deppe, H.U., "Medizinische Soziologie"., Frankfurt 1978

Diener, R.A.V., "Conflicting Societal Visions on the Nature of Information: Social, Cultural, Economic, and Political Perpectives", in: "1984: Challenges To an Information Society", Proceedings of the 47th ASIS Annual Meeting 1984, Vol.21

Dirlich, G., Furbach, U., Freksa, Ch., "Aspekte der Wissensrepraesentation in kuenstlichen

Systemen", in: Mandle, H., Fischer, P.M., "Lernen im Dialog mit dem Computer", Muenchen Wien Baltimore 1985

Doyle, J., "A Society of Mind - Multiple Perpectives, Reasoned Assumptions, and Virtual Copies", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Doyle, J., "A Truth Maintenance System", in: Webber, B.L., Nilsson, N.J., Readings in Artificial Intelligence", Palo Alto 1981

Dreyfuss, H., "Die Grenzen Kuenstlicher Intelligenz. Was Computer nicht koennen", Koenigstein 1985

Duncker, K., "Zur Psychologie des produktiven Denkens", Berlin, Heidelberg, New York 1963

Durkin, H., "Trial-and-error, gradual analysis, and sudden reorganization", in: Arch. Psychol. 30, Nr. 210, 1937

Eccles, J.C., "Das Gehirn des Menschen", Muenchen, Zuerich 1975

Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Eisenstadt, M., Kareer, Y., "Aspects of Human Problem Solving: The Use of internal Representations", in: Norman, D.A., Rumelhart, D.E., "Explorations in Cognition", San Francisco, 1975

Elithorn, A., Banerij, R.(eds.), "Artificial & Human Intelligence" Amsterdam 1984

Elstein, A.S., Shulman, L.S., Sprafka, S.A., "Medical Problem Solving. An Analysis of Clinical Reasoning", Cambridge 1979

Engel, P., "Functionalism, belief and content", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Engelberg, K.J., Knoepfler, S., "Dokumentation ueber Wissensrepraesentation in der KI-Forschung unter linguistischen Aspekten", Sonderforschungsbereich 99 Universitaet Konstanz 1983

Erman, L., "Tutorial-Materialien", IJCAI - 83, Karlsruhe 1983

Feigenbaum, E.A., "Themes and Case Studies of Knowledge Engineering", in: Mitchie, D.(ed), "Expert Systems in teh Micro Electronic Age" Edinburgh 1979

Feigenbaum, E.A., "The art of artificial intelligence. Themes and case studies of knowlegde engineering", in: Proceedings of the 5th IJCAI, 1977

Feigenbaum, E.A., Feldman, J. (eds), "Computers and Thought", New York 1963

Feigenbaum, E.A., Buchanan, B., Lederberg, J., "On generality and problem solving: A case study using the DENDRAL program"., in: Machine Intelligence 6, 1971

Feigenbaum, E.A., McCorduck, P., "The Fifth Generation", Reading, Mass., 1983

Feltovich, P.J., Johnson, P.E., Moller, J.H., Swanson, D.B., "LCS: The Role and Development of Medical Knowledge in Diagnostic Expertise", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., a.a.O.

Figge, U.L., "Gedaechtnis und Text", in: Papiere zur Textlinguistik, Bd. 52, Hamburg 1984

Figge, U.L., Job, U., "Das Gedaechtnis in sprachwissenschaftlicher Perspektive", Bochum 1985

Filman, R.E., Lamping, J., Montalvo, F.S., "Metaknowledge and Meta-Reasoning", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Fischer, G., et al., "PROKOP-Projekt", hier: Bd.1, "Einfuehrung in das interaktive

Programmieren", Darmstadt 1978

Fleck, L., "Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache", Frankfurt am Main 1980

Fodor, J., "The language of thought", Hassocks 1975

Forsyth, R. (ed), "Expert Systems. Principles and case studies", New York 1984

Fraser, B., "Pessimistische Ausblicke auf die Moeglichkeit zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Kommunikation", in: Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Freud, S., Vorlesungen zur Einfuehrung in die Psychoanalyse Und Neue Folge", Gesam. Werke, Bd. 1, Frankfurt am Main 1982

Friedrichs, G., Schaff, A.(Hrsg), "Auf Gedeih und Verderb. Mikroelektronik und Gesellschaft", Wien 1982

Fuenfte Generation, in: Spiegel, Nr.6/1983

Furbach, U., Dirlich, G., Freksa, Ch., "Towards a theory of knowledge representation systems", Report ATP-25-III-84, Muenchen 1984

Gagne, R.M., Smith, E.C., "A study of the effects of verbalization on problem solving", in: Journal of Experimental Psychology 63, 1962

Gammack, J.G., Young, R.M., "Psychological Techniques for Eliciting Expert Knowledge", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Gaschnig, J., Klahr, P., Pople, H., "Evaluation of Ecxpert Systems. Issues and Case Studies",in: Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B., "Building Expert Systems", Reading, Mass. 1983

Gerster, H.D., "Aussagenlogik, Mengen, Relationen", Freiburg 1981, 3. Auflage

Geiger, F., "Die Fuehrung einer Allgemeinpraxis", Muenchen 1969

Gigley, H.M., Computational Neurolinguistics - What is it All About?", in: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, Los Altos, Ca. 1985

Gill, K.S., Crisis and Creation - computers and the human future", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Goldstein, I., "The genetic graph: a representation for the evolution of procedural knowledge", in: Sleeman, D., Brown, J.S.(eds.), "Intelligent Tutoring Systems", London 1982

Goldstein, I., "The genetic epistemology of rule systems", in: International Journal of Man and Machine Studies, 11, 1979

Goldstein, I., Carr, B., "Overlays: A theory of modeling for computer aided instruction. AI Memo 406, AI Laboratory, MIT 1977

Gomez, F., Chandrasekavan, B., "Knowledge Organization and Distribution for Medical Diagnosis", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., "Readings in Medical Artificial Intelligence", Reading, Mass., 1984

Goodnow, J.J., Postman, L., "Das Lernen von Wahrscheinlichkeiten in einer Problemloesungssituation", in: Graumann, C.F.

Gorry, G.A., "Computer-Assisted Clinical Decision Making", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., "Readings in Medical Artificial Intelligence", Reading, Mass., 1984

Graham, N., "Artificial Intelligence. Making machines "think", Blue Ridge Summit, P.A., 1979

Graumann, C.F., "Denkpsychologie"

Greeno, J.G., "On the Acquisition of a Simple Cognitive Structure", in: Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Griffiths, J.M., King, D.W., "Educating the Information Professional of the Future", in: "1984: Challenges To an Information Society", Proceedings of the 47th ASIS Annual Meeting 1984, Vol.21

Groddeck, G., "Psychoanalytische Schriften zur Psychosomatik", Wiesbaden 1966

Guenther, G., "Beitrage zur Grundlegung einer operationsfaehigen Dialektik", Hamburg 1976

Guilford, J.P., Kettler, N.W., Christensen, P.R., "Das Wesen des allgemeinen Denkfaktors", in: Graumann, C.F.,

Guttmann, G., "Lehrbuch der Neuropsychologie", Bern, Stuttgart, Wien 1982, 3. Auflage

Haber, R.N., "Perception and thought: an information-processing analysis", in: Voss, J.F.(ed.), "Approaches to Thought", Columbus, 1969

Habermas, J., "Analytische Wissenschaftstheorie und Dialektik", in: Adorno, Th. W. et al., "Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie", Darmstadt, Neuwied 1974, 3.Auflage

Habermas, J., "Technik und Wissenschaft als Ideologie", Frankfurt am Main, 1971, 5. Auflage

Habermas, J., "Theorie des Kommunikativen Handelns", Frankfurt am Main, 1981

Habermas, J., "Was heisst Universalpragmatik", in: Apel, K.O. (Hrsg), "Sprachpragmatik und Philosophie", Frankfurt am Main 1982

Habermas, J., Erkenntnis und Interesse", Frankfurt am Main 1981, 6. Auflage

Hagert, G., "What's in a Mental Model? On Conceptual Models in Reasoning with Spatial Descriptions", in: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, Los Altos, Ca. 1985

Halbwachs, M., "Das Gedaechtnis und seine sozialen Bedingungen", Frankfurt am Main 1985

Hall, H.J., "Science, Information, and Responsibility", in: "1984: Challenges To an Information Society", Proceedings of the 47th ASIS Annual Meeting 1984, Vol.21

Hamm, H., "Allgemeinmedizin", Stuttgart 1975

Hansen, H.R., Schroeder, K.T., Weihe, H.J.(Hrsg), "Mensch und Computer. Zur Kontroverse ueber die oekonomischen und gesellschaftliche Auswirkungen der EDV", Muenchen, wien 1979

Harbordt, St., "Computersimulationen in den Sozialwissenschaften", Bd.1, Reinbek 1974

Hartmann, G.W., "Begriff und Kriterien der Einsicht", in: Graumann, C.F.

Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Hawkridge, D., "New Information Technology in Education", Baltimore 1983

Hayes, J.R., "Strategies in judgemental research", in: Kleinmuntz, B., (ed.),"Formal representation of human judgement", New York 1968

Hayes, P.J., "The Naive Physics Manifesto", in: Mitchie, D., a.a.O., 1979

Hayes-Roth, B., "A Blackboard Architecture for Control", in: Artificial Intelligence, Vol. 26,

No. 3, 1985

Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B., "Building Expert Systems", Reading, Mass. 1983

Hays, D., "Kognitive Netzwerke: Formen und Prozesse", in: Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Hayward, S.A., "Is a Decision Tree an Expert System", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Hebb, D.O., "Organization of behaviour", New York 1979

Heidegger, M., "Sein und Zeit", Tbingen 1979

Heisig, N., "Innere Medizin in der aerztlichen Praxis. Vom Leitsymptom zu Diagnose und Therapie", Stuttgart 1981

Hermann, H., "Meinen und Verstehen", Frankfurt 1976

Hoffer, E., et al., "Computer-aided instruction in medicine", in: Annual Review of Biophysical Engineering, No. 4, 1975

Hoffmann, G.E., "Informierte Buerger oder Technologie-Untertanen", in: Hansen, H.R., Schroeder, K.T., Weihe, H.J.(Hrsg), "Mensch und Computer. Zur Kontroverse ueber die oekonomischen und gesellschaftliche Auswirkungen der EDV", Muenchen, wien 1979

Hoffmann, J., "Das aktive Gedaechtnis", Berlin, Heidelberg, New York 1983

Hofstadter, D., "Goedel Escher Bach. Ein endlos geflochtenes Band", Stuttgart 1985

Hofstadter, D., "Metamagical Themes", New York 1985

Hofstadter, D.R., "Koennen Maschinen je kreativ sein?", in: Spektrum der Wissenschaft 11/1982

Hofstadter, D.R., "The Turing Test: A Coffeehouse Conversation", in: Hofstadter, D.R., Dennett, D.C., "The Mind's I. Fantasies and Reflections on Self and Soul" Brighton, Sussex 1981

Hofstadter, D.R., Dennett, D.C., "The Mind's I. Fantasies and Reflections on Self and Soul" Brighton, Sussex 1981

Hofstaetter, P.R., "Psychologie", Fischer Lexikon, 16. Auflage, Frankfurt am Main 1970

Holenstein, E., "Von der Hintergehbarkeit der Sprache", Frankfurt am Main 1980

Holton, G., "Thematische Analyse der Wissenschaft", Frankfurt am Main 1981

Honneth, A., "Von Adorno zu Habermas. Zum Gestaltwande°T kritischer Gesellschaftstheorie", in: Bonss, W., Honneth, A., "Sozialforschung als Kritik", Frankfurt am Main 1982

Horkheimer, M., "Gesellschaft im Uebergang", Frankfurt am Main 1981, 2. Auflage

Horkheimer, M., "Kritische Theorie", Bd. 1 und 2 (einbaendige Studienausgabe), Frankfurt am Main 1977

Horkheimer, M., "Sozialphilosophische Studien", Frankfurt am Main 1981, 2. Auflage

Horkheimer, M., "Verantwortung und Studium", in: Horkheimer, M., Adorno, Th.W., "Sociologica II", Franfurt am Main 1973, 3. Auflage

Horkheimer, M., "Zum Begriff der Vernunft", in: Horkheimer, M., Adorno, Th.W., "Sociologica II", Franfurt am Main 1973, 3. Auflage

Horkheimer, M., Adorno, Th.W., "Sociologica II", Franfurt am Main 1973, 3. Auflage

Hunter, J.R.W., "The expert medical computer", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Husserl, E., "Ideen zu einer reinen Phnomenologie und phnomenologischen Philosophie", 1950

Hyden, H., "Biochemische Lern- und Gedaechtnismodelle", in: Koestler, A., Smythies, J.R., "Das neue Menschenbild", Wien 1970

Ide, Th.R., "Die Technologie", in: Friedrichs, G., Schaff, A.(Hrsg), "Auf Gedeih und Verderb. Mikroelektronik und Gesellschaft", Wien 1982

Iversen, L.L., "Die Chemie der Signaluebertragung", in: "Gehirn und Nervensystem", Sonderband Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1985

Jaeggi, U., Honneth, A., "Theorie des Historischen Materialismus", Frankfurt am Main 1977

Jakob, P., "Remarks on the language of thought", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Jay, M., "Dialektische Phantasie", Frankfurt am Main, 1981

Johnson, L., Keravnou, E.T., "Expert Systems Technology. A Guide", Cambridge, Mass. 1985

Jores, A., "Der Mensch und seine Krankheit", Stuttgart 1956

Kahn, K., Gory, G.A., "Mechanizing Temporal Knoweldge", in: Artificial Intelligence, No. 9, 1977

Kail, R.V., Hagen, J.W., "Perspectives on the Development of Memory and Cognition", Hillsdale 1977

Kandel, E.R., "Kleine Verbaende von Nervenzellen", in: "Gehirn und Nervensystem", Sonderband Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1985

Katz, J.J., "Semantic theory", New York 1972

Kayser, D., "A computer scientist's view of meaning", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Keidel, W.D. (Hrsg.), "Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie", Stuttgart 1970, 2. Auflage

Kellner, D:, "Kulturindustrie und Massenkommunikation", in: Bonss, W., Honneth, A., "Sozialforschung als Kritik", Frankfurt am Main 1982

Kent, E.W., "The Brains of men and machines" New York 1981

Kidder, T., "Die Seele einer neuen Maschine", Stuttgart 1982

Kintsch, W. "Notes on the Structure of Semantic Memory", in: Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Kintsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Kleinmuntz, B., (ed), "Formal representations of human judgement", New York 1968

Kleinmuntz, B., "Problem solving: research, method, and theory", New York 1966

Koehler, W., "Dynamics in Psychology", New York 1940

Koestler, A., "Der Mensch - Irrlaeufer der Evolution", Bern, Muenchen 1978

Koestler, A., "Die Wurzeln des Zufalls", Frankfurt am Main, 3. Auflage

Koestler, A., "Die Nachtwandler", Frankfurt am Main 1980

Koestler, A., "The Act of Creation", New York 1966

Koffmann, E.B., Blount, S.E., "Artificial Intelligence and automatic programming in CAI", in: Artificial Intelligence, 6, 1975

Krappmann, L., "Soziologische Dimensionen der Identitaet", Stuttgart 1978, 5. Auflage

Krech, D., Crutchfield, R.S., "Grundlagen der Psychologie", Bd.1 und 2, Weinheim 1972, 2. Auflage

Krohn, R.G., "Wissenssoziologie und Wissenschaftssoziologie. Entwicklung eines gemeinsamen Untersuchungsrahmens", in: Stehr, N., Koenig, R.(Hrsg), a.a.O.

Kruesi, G., "Der praktische Arzt heute", Bern 1968

Krutch, J., "Experiments in Artificial Intelligence for Small Computers", Indianapolis 1981

Kuekelhaus, H., "Organismus und Technik", Frankfurt am Main 1981, 2. Auflage

Kuipers, B., Kassirer, J.P., "How to Discover a Knowledge Representation for Causal Reasoning by Studying an Expert Physician", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Kulikowski, C.A., "Artificial Intelligence Methods and Systems for Medical Consultation", in: Clancey, W., Shortliffe, E.H., a.a.O., 1984

Kutschera, F. von, Breitkopf, A., "Einfuehrung in die moderne Logik", Freiburg Muenchen 1979, 4. Auflage

Laplanche, J., Pontalis, J.B., "Das Vokabular der Psychoanalyse", Bd.1 und 2, Frankfurt am Main 1973

Laubsch, J.H., "Some thoughts about representing knowledge in instructional systems", in: Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence 1975

Lehnert, W.G., "Paradigmatic Issues in Cognitive Science", in: KIntsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Leithaeuser, Th., "Vergesellschaftung und Sozialisation des Bewusstseins", in: Leithaeuser, Th., Volmerg, B., Salje, G., Volmerg, U., Wutka, B., "Entwurf zu einer Empirie des Alltagsbewusstseins", Frankfurt am Main 1977

Leithaeuser, Th., Volmerg, B., Salje, G., Volmerg, U., Wutka, B., "Entwurf zu einer Empirie des Alltagsbewusstseins", Frankfurt am Main 1977

Lem, S., "Also sprach Golem". Frankfurt am Main 1984

Lem, S., "Summa technologiae", Frankfurt am Main 1981

Lenat, B.B., "Software fuer Kuenstliche Intelligenz", in: Spektrum der Wissenschaft, 11/1984

Lenat, D.B., Davis, R.D., Doyle, J., "Reasoning about Reasoning", in: Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B., a.a.O. 1983

Lenk, K., "Gesamtgesellschaftliche Implikationen der technischen Kommunikation", in: Hansen, H.R., Schroeder, K.T., Weihe, H.J.(Hrsg), a.a.O.

Lepenies, W., "Geschichte der Soziologie", Bd 1 - 4, Frankfurt am Main 1981

Lerner, E.J., "Why can't a computer be more like a brain?", in: high Technology, Vol.4, No.8,

1984

Lewandowski, Th., "Linguistisches Woerterbuch", Bd.1, 2 und 3, Heidelberg 1979/80, 3. Auflage

Liben, L.S., "Memory in the Context of Cognitive Development: The Piagetian Approach", in: Kail, R.V., Hagen, J.W., "Perspectives on the Development of Memory and Cognition", Hillsdale 1977

Lifschitz, V., "Closed-world Databases and circumscription", in: Artificial Intelligence, Vol 27, No. 2, 1985

Lindsay, P.H., Norman, D.A., "An Introduction to Psychology", New York London 1973, 4. Auflage

Linton, M., "Memory for Real-World Events", in: Norman, D.A., Rumelhart, D.E., "Explorations in Cognition", San Francisco, 1975

Lorenzen, P., "Formale Logik", Berlin 1970

Lorenzer, A., "Symbol, Interaktion und Praxis", in: Psychoanalyse als Sozialwissenschaft", Frankfurt am Main, 2. Auflage

Lueth, P., "Die Medizin - Natur - oder Gesellschaftswissenschaft?", in: Volkholz, V. et al. (Hrsg), "Analyse des Gesundheitssystems", Frankfurt am Main 1974

Lukaszewicz, W., "General Approach to Nonmonotonic Logics", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Lullies, H., "Erregung und Erregungsleitung: Neurophysiologie", in: Keidel, W.D. (Hrsg.), "Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie", Stuttgart 1970, 2. Auflage

Maier, N.R.F., "Das Denken beim Menschen", in: Graumann, C.F.,"Denkpsychologie"

Maier, N.R.F., "An aspect of human reasoning", in: British Journal of Psychology 24, 1933

Mandler, G., "Cohabitation in the Cognitive Sciences", in: KIntsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Marcuse, H., "Der eindimensionale Mensch", Neuwied, Berlin 1971, 4. Auflage

Marcuse, H., "Kultur und Gesellschaft 1", Frankfurt am Main 1971, 10. Auflage

Martius, G., Schmidt-Gollwitzer, "Differentialdiagnose in Geburtshilfe und Gynaekologie", Stuttgart 1984

Marx, H., "Differentialdiagnostische Leitprogramme in der Inneren Medizin", Berlin, Heidelberg, New York 1976

McCarthy, J., "Circumscription - A Form of Non-monotonic Reasoning", in: Webber, B.L., Nilsson, N.J."Readings in Artificial Intelligence", Palo Alto 1981

McCarthy, J., Hayes, P.,"Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence", in: Webber, B.L., Nilsson, N.J."Readings in Artificial Intelligence", Palo Alto 1981

McDermott, D., "Artificial Intelligence Meets Natural Stupidity", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

McDermott, J., "Extracting Knowledge From Expert Systems", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

McKean, K., "Computers, Fiction, and Poetry", in: BYTE, Vol.7, No.7, 1982

Meili, R., "Lehrbuch der psychologischen Diagnostik", Bern Stuttgart 1961
Melle, W. van., "A domain independent production-rule system for consultation program", in:

Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence 1979

Meltzer, B., "Handling the unconscious", in: Elithorn, A., Banerij, R.(eds.), "Artificial & Human Intelligence" Amsterdam 1984

Merleau-Ponty, M., "Phaenomenologie der Wahrnehmung", Berlin 1966

Michalski, R.S., Carbonell, J.G., Mitchell, T.M.,"Machine Learning", Berlin, Heidelberg, New York 1984

Minnis, N. (Hrsg), "Perspektiven der Linguistik", Muenchen 1974

Minsky, M., "A Framework for Representing Knowledge", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Minsky, M., "Communication with alien intelligence", in: BYTE, No.4, 1985

Minsky, M.L., "Materie, Geist, Modell", in: Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Mitchie, D., "Expert Systems in the Micro Electronic Age", Edinburgh 1979

Mitchie, D., Johnston, R., "Der kreative Computer. Kuenstliche Intelligenz und menschliches Wissen", Hamburg, Zuerich 1985

Mittelstrass, J., "Wissenschaft als Lebensform", Frankfurt am Main 1982

Morowitz, H.J., "Rediscovering the Mind", in: Hofstadter, D.R., Dennett, D.C., "The Mind's I. Fantasies and Reflections on Self and Soul" Brighton, Sussex 1981

Mosell, H., "Sprache im Computer - ein Weg zur Gesellschaftsanalyse?", Darmstadt 1974

Mouloud, N., "Machines and mind: The functional shere and epistemological circles", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Mueller, E.T., Dyer, M.G., "Daydreaming in Humans and Computers", in: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, Los Altos, Ca. 1985

Muellert, N., "Schoene elektronische Welt", Reihe: Technologie und Politik 19, Reinbek bei Hamburg 1982

Mumford, L. "Mythos der Maschine", Frankfurt am Main 1981, 4. Auflage

Mylopoulos, J., Levesque, H., "An Overview of Knowledge representation", in: Brodie, M.L., et al. (Eds), "On Conceptual Modelling: Perspectives from Artificial Intelligence Databases and Programming Languages", New York 1983

Mylopoulos, J., Levesque, H., Tutorial IJCAI-83,

Nanta, W.J.H., Feirtag, M., "Die Architektur des Gehirns", in: "Gehirn und Nervensystem", Sonderband Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1985

Narayanan, A., "What is it like to be a machine", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Negrotti, M., "How AI Peple think", Brussel 1983

Neisser, U., "The multiplicity of thought", Brit. Journal of Psychology, No. 54, 1963

Neumann, B., "Bildverstehen", in: Bibel, W., Siekmann, J.H., (Hrsg), "Kuenstliche Intelligenz", Informatik-Fachbereichte Nr. 59, Berlin, Heidelberg, New York 1982
Newell, A., Simon, H.A., "Human Problem Solving", Englewood Cliffs, N.J., 1972

Nilsson, N.J., "Principles of Artificial Intelligence", Berlin, Heidelberg, New York 1982

Norman, D.A., "Memory and Attention", New York 1969

Norman, D.A., Bobrow, D.G., "Descriptions. An intermediate stage in memory retrieval", in: Cognitive Psychology, 11, 1979

Norman, D.A., Rumelhart, D.E., "Explorations in Cognition", San Francisco 1975

O'Shea, T., Eisenstadt, M., "Artificial Intelligence. Tools, Techniques and Applications", New York 1984

O'Shea, T., "Rule-based Computer Tutors", in: Mitchie, D., "Expert Systems in the Micro Electronic Age", Edinburgh 1979

Odell, J.O., "On the Possibility of Natural Language Processing: Some Philosophical Objections", in: Theoretical Linguistics, Vol 11, No. 1/2 1984

Oerter, R., "Psychologie des Denkens", Donauwoerth, 1974, 4.Auflage

Orwell, G., "1984", Zuerich 1974, 22. Auflage

Osborne, A., "Treibjagd. Im Strudel der Mikroelektronik", Berkeley, ca. 1980

Otte, M., "Wissen als "society of minds", in: Papert, S., "Mindstorms. Kinder, Computer und Neues Lernen", Basel, Boston, Stuttgart 1982

Pages, J.C., "Artificial psychology versus artificial intelligence", in: Elithorn, A., Banerij, R.(eds.), "Artificial & Human Intelligence" Amsterdam 1984

Palmer, A., "The limits of AI: Thought experiments and conceptual investigations", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Papert, S., "Mindstorms. Kinder, Computer und Neues Lernen", Basel, Boston, Stuttgart 1982

Patterson, P.H., Potter, D.D., "Chemische Differenzierung von Nervenzellen", in: "Gehirn und Nervensystem", Sonderband Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1985

Pauker, S.G., Gorry, G.A., Kassirer, J.P., Schwartz, W.B., "Towards the Simulation of Clinical Cognition: Taking a Present Illness by Computer", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., "Readings in Medical Artificial Intelligence", Reading, Mass., 1984

Peirce, Ch.S., "Phaenomen und Logik der Zeichen", Frankfurt am Main 1983

Pfaff, K., "Sinn der Krankheit - Unsinn von Normalitaet", in: "Gesundheitslernen. Aufgaeb fuer jeden", Dokumentation des 2. Studientages zum Gesundheitslernen an der Universitaet Dortmund 1984

Pfaff, K., "Ueber Verwandlung, Metamorphose und Lernen", Dortmund 1985

Pfaff, K., "Reflexionen und Deskriptionen zum epochalen Bewusstseinswandel. Dargestellt als Interpretation der Philosophie Gotthard Guenthers", Typoscript, Dormund 1983

Piaget, J., "Abriss der genetischen Epistemologie", Stuttgart 1980

Piaget, J., "Einfuehrung in die genetische Erkenntnistheorie", Frankfurt am Main 1981, 2. Auflage

Piaget, J., "Psychologie der Intelligenz", Stuttgart 1980

Popper, K.R., "Die Logik der Sozialwissenschaften", in: Adorno, Th. W. et al., "Der

Positivismusstreit in der deutschen Soziologie", Darmstadt, Neuwied 1974, 3.Auflage

Popper, K.R., Eccles. J.C., "Das Ich und sein Gehirn", Muenchen 1982

Primio, F. di, Brewka, G., "BABYLON: Kernsystem einer integrierten Umgebung fuer Entwicklung und Betrieb von Expertensystemen", Nachr, f. Dokum. 36, GMD, St.Augustin 1985

Pschyrembel, W., "Klinisches Woerterbuch", Berlin, New York 1982, 254. Auflage

Puppe, B., Puppe, F., "Overview on MED1: a Heuristic Diagnostics System with an Efficient Control Structure", in: Informatik-Fachbereichte 76, GWAI-83, Berlin, Heidelberg, New York 1983

Putnam, H., "Models and reality", in: Benacerraf, P., Putnam, H.(eds), "Philosophy of mathematics", Cambridge, Mass. 1985, 2. Auflage

Putnam, H., "Reductionism and the Nature of Psychology", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Quine, W.V., "Truth by convention", in: Benacerraf, P., Putnam, H., "Philosophy of mathematics", Cambridge, Mass. 1985, 2. Auflage

Quinlan, "Consistency and Plausible Reasoning", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Raulefs, P., "Expertensysteme", in: Bibel, W., Siekmann, J.H., (Hrsg), "Kuenstliche Intelligenz", Informatik-Fachbereichte Nr. 59, Berlin, Heidelberg, New York 1982

Reese, H.W., "Imagery and Associative Memory", in: Kail, R.V., Hagen, J.W., "Perspectives on the Development of Memory and Cognition", Hillsdale 1977

Reggia, J.A., "Virtual Lateral Inhibition in Pralalel Activation Modells of Associative Memory", in: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, Los Altos, Ca. 1985

Reichardt, W., "Gehirn und Computer", etz Bd. 105, VDE-Kongress '84, Heft 24, 1984

Reinhardt, F., Soeder, H., "DTV-Atlas zur Mathematik", Bd.1 und 2, Muenchen 1978, 3. Auflage

Reiter, R., "On Closed World Data Bases", in: Webber, B.L., Nilsson, N.J."Readings in Artificial Intelligence", Palo Alto 1981

Retti, J. (ed), "Artificial Intelligence", Stuttgart 1984

Rice, R.E.,"New Patterns of Social Structure in an Information Society", in: "1984: Challenges To an Information Society", Proceedings of the 47th ASIS Annual Meeting 1984, Vol.21

Rich, E., "Artificial Intelligence", McGraw Hill 1983

Ritchie, D., "Gehirn und Computer. Die Evolution einer neuen Intelligenz", Stuttgrat 1984

Robins, R.H., "Die Struktur der Sprache" in: Minnis, N. (Hrsg), "Perspektiven der Linguistik", Muenchen 1974

Roessler, W., Viefhues, H., "Medizinische Soziologie", Stuttgart 1978

Rohde, U., "Expertensysteme", in: MC, 3/1983

Rollinger, C.-R., "How to Represent Evidence - Aspects of Uncertain Reasoning", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Rosch, E., "Principles of Categorization", in: Rosch, E., Lloyd, B.B., "Cognition and

Catagorization", Hillsdale N.J. 1978

Rosch, E., Mervis, C.B., "Familiy Resemblances. Studies in the internal structure of categories", in: Cognitive Psychology, No. 7, 1975

Rowney, D.K., "The Historian and the Microcomputer", in: BYTE, Vol.7, No.7 1982

Rumelhart, D.E., Lindsay, P.H., Norman, D.A., "A Process Modell for Long-Term Memory", in: Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Rustemeyer, R., "Zur Dezentralisierung des Subjekts im Neueren Franzoesischen Strukturalismus", Essen 1985

Ryle, G., "Denken", in: Graumann, C.F., a.a.O.

Sartre, J.P., "Das Imaginaere. Phaenomenologische Psychologie der Einbildungskraft", Reinbek bei Hamburg 1971

Sauers, R., Walsh, R., "On the Requirements on Future Expert Systems", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Savory, St., "Die KI-Forschung in der Bundesrepublik", in: Spektrum der Wissenschaft, 6/1985

Schade, J.P., "Differential growth of nerve cells in cerebral cortex", in: Growth, 23, 1959

Schank, R., Hunter, L., "The Question to understand Thinking", in BYTE, No.4, 1985

Schank, R.C., "The Cognitive Computer", Reading, Mass. 1984

Schank, R.C., Abelson, R.P., "Scrips, plans, goals and understanding", Hillsdale, N.J. 1977

Schank, R.C., Colby, K.M., "Computer Models of Thought and Language", San Francisco 1973

Schefe, P., "Some fundmental issues in knowledge representation", in: Informatik Fachbereichte, Nr. 58: GWAI-82, Berlin, Heidelberg, New York 1982

Scheibel, M.E., Scheibel, A.B., "Some structuro-functional correlates of development in young cats", in: Hernandez-Peon, R. (ed.), "The physiological basis of mental activity", EEG clin. Neurophysiol. Suppl. 24, 1961

Schischkoff, G. (Hrsg), Philosophisches Woerterbuch", Stuttgart 1982, 21. Auflage

Schmied-Kowarzik, W., "Das spekulative Wissen oder die Ekstasis des Denkens", in: Duerr, H.P., "Der Wissenschaftler und das Irrationale", Bd.II, Frankfurt am Main 1982

Scholz, R.W., (ed.), "Decision making under Uncertainty", Amsterdam new York Oxford 1983

Schroeder, K.T."Erkenntnistheoretische und methodologische Fragen einer sozialwissenschaftliche fundierten, oekonomischen Theorie, der elektronischen Datenverarbeitung", in: Hansen, H.R., Schroeder, K.T., Weihe, H.J.(Hrsg), a.a.O.

Schubert, L.K., "Extending the Expressive Power of Semantic Networks", in: Artificial Intelligence, Vol. 7, 1976

Searle, J., "Ausdruck und Bedeutung", Frankfurt am Main 1982

Searle, J.R., "Geist, Hirn und Wissenschaft", Frankfurt am Main 1986

Searle, J.R., "Minds, Brains, and Programs", in: Hofstadter, D.R., Dennett, D.C., "The Mind's I. Fantasies and Reflections on Self and Soul" Brighton, Sussex 1981

Sharkey, N.E., Pfeifer, R., "Uncomfortable bedfellows; cognitive psychology and AI", in:

Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Sherman, H.B., "A Comparative Study of PIP and INTERNIST", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Shortliffe, E.H., Buchanan, B.G., Feigenbaum, E.A., "Knowledge Engineering for Medical Decision Making: A Review of Computer-Based Clinical Decision Aids", in: Clancey, W.J., Shortliffe, H.E., a.a.O.

Shortliffe, E.H., Buchanan, B.G., "A Model of Inexact Reasoning in Medicine", in: Buchanan, B.G., Shortliffe. E.H., a.a.O., 1984

Siegenthaler, W., Hegglin, M., "Differentialdiagnose innerer Krankheiten", Stuttgart 1975, 13. Auflage

Siekmann, J.H., "An der Schwelle zu einer neuen Computergeneration", in: Siemens-Zeitschrift 58, Heft 1/1984

Siekmann, J.H., "Einfuehrung in die Kuenstliche Intelligenz", in: Bibel, W., Siekmann, J.H., (Hrsg), "Kuenstliche Intelligenz", Informatik-Fachbereichte Nr. 59, Berlin, Heidelberg, New York 1982

Simon, H., "Why should Machines Learn", in: Michalski, R.S., Carbonell, J.G., Mitchell, T.M.,"Machine Learning", Berlin, Heidelberg, New York 1984

Simon, H.A., Newell, A., "Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search", in: Haugeland, J.(ed), "Mind Design", Cambridge Mass. 1982

Sleeman, D., Brown, J.S.(eds.), "Intelligent Tutoring Systems", London 1982

Sloman, A., "Epistemology and Artificial Intelligence", in: Mitchie, D.(ed), "Expert Systems in the Micro Electronic Age" Edinburgh 1979

Sloman, A., "The Computer Revolution in Philosophy", Hassocks, Sussex 1978

Sloman, A., "The structure of the space of possible minds", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Sloman, A., "Towards a computational theory of mind", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Sloman, A.. McDermott, D., Woods, W.A., Smith, B., Hayes, P., "Under what Conditions Can a Machine Attribute Meanings to Symbols", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Sloman, A., Why We need Many Knowledge Representation Formalisms", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Sowa, J.F., "Conceptual Structures", Reading, Mass., 1983

Sparck Jones, K., "Natural Language Interfaces for Expert Systems", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Speck, J. (Hrsg), "Handbuch wissenschaftstheoretischer Begriffe", Bd.1, 2 und 3, Goettingen 1980

Spencer, D.D., "Computers in Society. The Wheres, Whys, and Hows of Computer Use", Rochelle Park, N.J. 1974

Stefik, M., "Planning with constraints", Rep. No.STAN-CS-80-784, Computer Science Dept., Stanford University 1980

Stegmueller, W., "Hauptstroemungen der Gegenwartsphilosophie", Bd. I und II, Stuttgart 1979, 6.

Auflage

Stehr, N., "Zur Soziologie der Wissenschaftssoziologie", in: Stehr, N., Koenig, R.(Hrsg), "Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien", Sonderheft 18 der Koelner Zeitschrift fuer Soziologie und Sozialpsychologie, Opladen 1975

Steinbuch, K., "Automat und Mensch.Auf dem Weg zu einer kybernetischen Anthropologie", Berlin, Heidelberg New York 1971

Steinbuch, K., "Die informierte Gesellschaft", Stuttgart 1966

Steinmueller, W., "Informationstechnologien und Informationssysteme: Folgen und Alternativen", in: "Technologie und Politik 19; Schoene elektronische Welt" , Reinbek bei Hamburg 1982

Steinmueller, W., "Strukturen der Datenzeit", in: v.Greiff, B., "Das Orwellsche Jahrzehnt und die Zukunft der Wissenschaft", Berlin 1981

Stevens, A., Collins, A., Goldin, S.E., "Misconceptions in student's understanding", in: Sleeman, D., Brown, J.S.(eds.), "Intelligent Tutoring Systems", London 1982

Stevens, Ch.F., "Die Nervenzelle", in: "Gehirn und Nervensystem", Sonderband Spektrum der Wissenschaften, Heidelberg 1985

Stoerig, H.J., "Kleine Weltgeschichte der Philosophie", Stuttgart 1962

Stoyan, H., Goerz, G., "Lisp. Eine Einfuehrung in die Programmierung", Berlin Heidelberg New York 1985

Strawson, P.F., "Bedeutung, Wahrheit und Kommunikation", in: Minnis, N. (Hrsg), "Perspektiven der Linguistik", Muenchen 1974

Suellwold, F., "Bedingungen und Gesetzmaessigkeiten des Problemloesungsverhaltens", in: Graumann, C.F.

Suppes, P., "Some General Remarkes on the Cognitive Sciences", in: KIntsch, W., Miller, J.R., Polson, P.G.(eds.), "Method and Tactics in Cognitive Science", Hillsdale 1984

Suwa, M., Scott, A.C., "Completeness and Consistency in a Rule-Based System", in: Buchanan, B.G., Shortliffe,

Szolovits, P., Pauker, St.G., "Categorical and Probabilistic Reasoning in Medical Diagnosis", in: Clancey, W., Shortliffe, E.H., a.a.=. 1984

Tiercelin, C., "Peirce on machines, self-control and intentionality", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Touretzky, D.S., Hinton, G.E., "Symbols among Neurons: Details of a Connectionist Inference Architecture", in: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Angeles, Los Altos, Ca. 1985

Trabasso, T., "The Role of Memory as a System in Making Transitive Inferences", in: Kail, R.V., Hagen, J.W., "Perspectives on the Development of Memory and Cognition", Hillsdale 1977

Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Tulving, E.,"Episodic and Semantic Memory", in: Tulving, E., Donaldson, W. (eds), in: "Organization of Memory", New York 1972

Turing, A., "Kann eine Maschine denken", Kursbuch 1967
Turing, A.M., "Computing Machinery and Intelligence", in: Hofstadter, D.B., Dennett, D.C.,

a.a.O. 1981

Turkle, S., "Die Wunschmaschine. Vom Entstehen der Computerkultur", Reinbek bei Hamburg 1984

Ullmann, St., "Semantik", in: Minnis, N. (Hrsg), "Perspektiven der Linguistik", Muenchen 1974

Vandamme, F., Vervenne, D., De Waele, D., et al., "A Primer on Expert Systems", Ghent 1985

Viefhues, H., "Die Frage nach der Frage, auf die das Bochumer Modell eine Antwort sein koennte", Bochum 1982

Viefhues, H., "Resozialisation: Sozialanamnese und Sozialtherapie", in: ders. (Hrsg), "Lehrbuch der Sozialmedizin", Stuttgart 1981

Voss, J.F.(ed.), "Approaches to Thought", Columbus, 1969

Voss, J.F., "On the Relationship of Associative and Organizational Process", in: Tulving, E., Donaldson, W., "Organization of Memory", New York 1972

Vossschulte, K., Lasch, H.G., Heinrich, F., "Innere Medizin und Chirugie", Stuttgart 1979

Wahlster, W., "Natuerlichsprachliche Systeme", in: Bibel, W., Siekmann, J.H., (Hrsg), "Kuenstliche Intelligenz", Informatik-Fachbereichte Nr. 59, Berlin, Heidelberg, New York 1982

Wahlster, W., "Die Repraesentation von vagem Wissen in natuerlichsprachlichen Systemen der Kuenstlichen Intelligenz", 1977

Wahrig, G., "Deutsches Woerterbuch", Guetersloh Berlin 1977

Wallis, J.W., Shortliffe, E.H., "Customerized Explanations Using Causal Knowledge", in: Buchanan, B., Shortliffe, E.H., a.a.O. 1984

Wason, P.C., Johnson-Laird, P.N. (eds), "Psychology of reasoning: structure and content", Cambridge, Mass., 1972

Webber, B.L., Nilsson, N.J., "Readings in Artificial Intelligence", Palo Alto 1981

Weed, L.L., "Medical records and patient care", Cleveland Ohio, 1971

Weingart, P.(Hrsg), "Wissenschaftssoziologie I. Wissenschaftliche Entwicklung als sozialer Prozess", frankfurt am Main, 1972

Weisbecker, L., "Hormone", in: Keidel, W.D. (Hrsg.), "Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie", Stuttgart 1970, 2. Auflage

Weiss, S.M., Kulikowski, C.A., "A Practical Guide to Designing Expert Systems", London 1984

Weizenbaum, J., "Der Einfluss von Computern auf die Gesellschaft", in: Psyche 29, 1975

Weizenbaum, J., "Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft", Frankfurt 1980, 2. Auflage

Weizenbaum, J., "Ueber Computer, Prognosen und Sprache", in: v.Greiff, B., "Das Orwellsche Jahrzehnt und die Zukunft der Wissenschaft", Berlin 1981

Wellmer, A., "Kommunikation und Emanzipation", in: Jaeggi, U., Honneth, A., "Theorie des Historischen Materialismus", Frankfurt am Main 1977

Werth, R., "Bewusstsein. Psychologische, neurologische und wissenschaftstheoretische Aspekte", Berlin, Heidelberg, New York 1983

Wertheimer, M., "Ueber Schlussprozesse im produktiven Denken", in: Graumann, C.F.
Wertheimer, M., "Productive Thinking", New York 1945

Wescourt, K.T., Hemphill, L., "Representing and teaching knowledge for troubleshooting/debugging", Tech. Rep. 292, Institute for Mathematical Studies in Social Science, Stanford University 1978

Wessels, M.G., "Kognitive Psychologie", New York 1984

Wettler, M., "Sprache, Gedaechtnis, Verstehen", New York 1980

Whitby, B., "AI: some immediate dangers", in: Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

White, A.P., "Inference Deficiencies in Ruel-Based Expert Systems", in: Bramer, M.A.(ed.), "Research and development in expert systems", Cambridge 1985

Whorf, B.L., "Science and linguistics", in: Carroll, J.B., Language, thought and reality: Selected writings of Benjamin Lee Whorf", New York, 1956

Wiener, O., "Turings Test. Vom dialektischen zum binaeren Denken", in: Kursbuch 75: "Computerkultur", Berlin 1984

Wildenberg, D., Computer Simulation in University Teaching", Amsterdam, New York, Oxford 1981

Wilensky, R., "Memory and Inference", in: Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence", Los Altos 1983

Wilks, Y., "Sprachverstehende Systeme in der Kuenstlichen Intelligenz. Ueberblick und Vergleich", in: Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Wilks, Y., Bien, J., "Beliefs, points of view and multiple environments", in: Elithorn, A., Banerij, R.(eds.), "Artificial & Human Intelligence" Amsterdam 1984

Winograd, T., "Ein prozedurales Modell des Sprachverstehens", in: Eisenberg, P.(Hrsg), "Semantik und Kuenstliche Intelligenz. Beitraege zur automatischen Sprachverarbeitung II", Berlin, New York 1977

Winograd, T., "Software fuer Sprachverarbeitung", in Spektrum der Wissenschaft, 11/1984

Winograd, T., Bobrow, D.G., "An overview of KRL, a knowledge representation language", in: Cognitive Science 1, 1977

Winston, P.H., "Artificial Intelligence", Reading, Mass., 1984, 2. Auflage

Winston, P.H., Artificial Intelligence", Reading, Mass. 1977

Wittgenstein, L., "Bemerkungen ueber die Philosophie der Psychologie", Schriften 8, Franfurt am Main, 1982

Wittgenstein, L., "Philosophische Untersuchungen", Frankfurt am Main 1971

Woodworth, R.S., Sells, S.B., "Ein atmosphaerischer Effekt im formalen syllogistischen Denken", in: Graumann, C.F.

Wygotski, L.S., "Denken und Sprechen", Noerdlingen 1974, 5.Auflage

Yazdani, M., Narayanan, A.(eds.), "Artificial Intelligence. human effects", Chichester 1984

Yazdani, M., "Creativity in men and machines", in: Torrance, St.(ed), "The mind and the machine. Philosophical aspects of artificial intelligence", Chichester 1984

Yazdani, M., "New Horizons in Educational Computing", Chichester 1984
Young, R.M., "Production System for Modelling Human Cognition", in: Mitchie, D.(ed), "Expert

Systems in teh Micro Electronic Age" Edinburgh 1979

Yu, V.L., Fagan, L.M., Bennett, S.W., "An Evaluation of MYCIN'S Advice", in: Buchanan, B.G., Shortliffe,

Ziman, J.M., 'Der vielschichtige Schnittbereich von Wissenschaft und Gesellschaft", in Stehr, N., Koenig, R.(Hrsg), a.a.O.